

TUGAS AKHIR - TL 141584

SIMULASI PROSES PEMOTONGAN BAJA KARBON RENDAH AISI 1018 DENGAN MESIN BUBUT MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

MUSTAFID AMNA RAMBEY
NRP. 02511340000076

Dosen Pembimbing
Mas Irfan P.Hidayat, S.T, M.Sc, Ph.D
Wikan Jatimurti, S.T, M.Sc

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018



TUGAS AKHIR - TL141584

SIMULASI PROSES PEMOTONGAN BAJA KARBON RENDAH AISI 1018 DENGAN MESIN BUBUT MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Mustafid Amna Rambey
NRP 02511340000076

Dosen Pembimbing :

Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.
Wikan Jatimurti, ST., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL141584

SIMULATION OF AISI 1018 LOW CARBON STEEL CUTTING PROCESS WITH LATHE MACHINE USING FINITE ELEMENT METHOD

Mustafid Amna Rambey
NRP 2511340000076

Advisor :

Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.
Wikan Jatimurti, ST., M.Sc.

Department of Materials Engineering
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**SIMULASI PROSES PEMOTONGAN BAJA KARBON
RENDAH AISI 1018 DENGAN MESIN BUBUT
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Metalurgi Manufaktur
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

MUSTAFID AMNA RAMBEY

NRP. 025 11 34 0000 076

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir

1. Mas Irfan P.Hidayat, S.T, M.Sc, Ph.D. (Pembimbing I)
2. Wikan Jatimurti, S.T, M.Sc. (Pembimbing II)



(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

SIMULASI PROSES PEMOTONGAN BAJA KARBON RENDAH AISI 1018 DENGAN MESIN BUBUT MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Nama Mahasiswa : Mustafid Amna Rambey
NRP : 02511340000076
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing : Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., Ph.D
Wikan Jatimurti, ST., M.Sc.

Abstrak :

Tegangan geser dan gaya pada permukaan material dan perkakas potong dihasilkan oleh sudut dan kedalaman potong yang berbeda. Secara khusus dua analisis berbeda dilakukan untuk membandingkan pengukuran gaya potong dan tegangan geser yaitu dengan kedalaman, sudut potong, dan tipe pemotongan tertentu. Proses simulasi permesinan dilakukan dengan menggunakan alat potong single point High Speed Steel (HSS). Selama proses machining deformasi sangat terkonsentrasi di zona yang sangat kecil dan tegangan yang dihasilkan di zona deformasi mempengaruhi benda kerja dan alat. Analisa dilakukan pada material benda kerja AISI 1018 mild steel dengan menggunakan perkakas potong AISI T15 High Speed Steel. Variabel yang digunakan pada penelitian ini antara lain adalah sudut serpih (rake angle) 15° , 0° , dan -15° , kemudian kedalaman potong yaitu 1 mm dan 1.5 mm, dan yang terakhir adalah membandingkan dua tipe pemotongan yaitu orthogonal (tegak lurus) dan oblique (miring). Pada penelitian ini telah diteliti bagaimana gaya potong dan tegangan geser pada perkakas potong dan material uji pada saat proses pemotongan dan menggunakan metode smooth particle hydrodynamics. Dari hasil simulasi menunjukkan penurunan gaya potong terjadi ketika sudut serpih perkakas mengalami penurunan dari 15° ke -15° , Nilai

tegangan geser maksimum diamati memiliki nilai tertinggi pada sudut 15° dengan kedalaman 1.5 mm, kemudian nilai tegangan geser terendah diamati pada sudut serpih 15° dengan kedalaman potong 1mm. Proses simulasi juga telah dilakukan untuk mengamati pengaruh dari kedalaman potong dan tipe pemotongan.

Kata Kunci : Perkakas potong single point, alat HSS, Analisis Elemen Hingga, Tegangan, Gaya Potong, Smooth Particle Hydrodynamics.

SIMULATION OF AISI 1018 LOW CARBON STEEL CUTTING PROCESS WITH LATHE MACHINE USING FINITE ELEMENT METHOD

Name : Mustafid Amna Rambey
NRP : 02511340000076
Department : Material Engineering Department
Advisors : Mas Irfan P.Hidayat, P.hD
Wikan Jatimurti, ST., M.Sc.

ABSTRACT

The shear stress and force on the surface of the material and cutting tools are produced by different angles and cutting depths. In particular two different analyzes were performed to compare the measurement of cut and shear stresses with the depth, cutting angle, and certain types of cuts. Machining simulation process is done by using single point tool High Speed Steel (HSS). During the machining process deformation is highly concentrated in very small zones and the voltage generated in the deformation zone affects workpieces and tools. The analysis was performed on AISI 1018 mild steel workpiece material using cutting tool AISI T15 High Speed Steel. The variables used in this study include rake angle 15° , 0° , and -15° , then cutting depth is 1 mm and 1.5 mm, and the last is comparing two types of cutting that is orthogonal (perpendicular) and oblique (tilt). In this research has been studied how the cut and shear stress on cutting tool and test material at the time of cutting process and using method of smooth particle hydrodynamics. From the simulation results showed a decrease in cutting force occurs when the angle of the tool shoot decreases from 15° to -15° , the maximum shear stress value observed has the highest value at an angle 15° of

1.5 mm depth of cut, then the lowest shear stress value is observed at the rake angle 15° with 1mm cutting depth. The simulation process has also been performed to observe the effect of cutting depth and cutting type.

Keywords: Single point cutting tool, HSS tool, Finite Element Analysis, Stress, Solid Modeling.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya, tidak lupa shalawat serta salam penulis panjatkan kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis diberi kesempatan untuk menyelesaikan Tugas Akhir. Tugas Akhir ditujukan untuk memenuhi mata kuliah wajib yang harus diambil oleh mahasiswa Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), penulis telah menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul **“Simulasi Proses Pemotongan Metal dengan Metode Elemen Hingga”**. Penulis ingin berterima kasih juga kepada :

1. Allah SWT atas karunia, rahmat, dan hidayahnya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan lancar.
2. Kedua Orang Tua, yang telah mendukung secara moril maupun materil serta doa yang selalu dipanjatkan demi kesehatan ,keselamatan dan kelancaran anaknya dalam menempuh studi.
3. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T, M.Eng., selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
4. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan bekal yang sangat bermanfaat.
5. Bapak Wikan Jatimurti, ST., M.Sc. selaku co dosen Pembimbing yang telah memberikan banyak ilmu.
6. Ibu Amaliya Rasyida ST., M.Sc. Selaku dosen wali yang sangat mengayomi
7. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
8. Teman-teman Lab. Komputasi yang telah membantu tugas akhir saya yang sudah banyak memberi saran serta ilmu untuk tugas akhir

9. Keluarga MT15 yang banyak memberikan saya pengalaman berharga selama di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi.

10. Dan seluruh pihak yang telah memberikan partisipasi dalam Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa dalam pembuatan laporan ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik yang membangun dari pembaca demi perbaikan dan kemajuan bersama. Penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat dan dimanfaatkan dengan baik.

Surabaya, Januari 2018

Penulis,
Mustafid Amna Rambey

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK.....	vii
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix

BAB I PENDAHULUAN

1.1	Latar Belakang	1
1.2	Rumusan Masalah	2
1.3	Batasan Masalah	2
1.4	Tujuan Penelitian	3
1.5	Manfaat Penelitian	3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1	Proses Pemotongan Logam	5
2.2	Bahan Pahat	10
2.3	Bahan Material	12
2.4	Temperatur Pada Proses Pembubutan.....	15
2.5	Metode Elemen Hingga Proses Pemotongan	21
2.6	Software FE	27
2.7	Model Pemotongan SPH.....	28
2.8	Analisa Gaya.....	30

BAB III METODE PENELITIAN

3.1	Diagram Alir Penelitian	33
3.2	Spesifikasi Material Penelitian	34
3.2.1	Material Penelitian	34
3.2.2	Geometri Penelitian	35
3.3	Peralatan Penelitian	42
3.4	Prosedur Penelitian	42

3.4.1	<i>Meshing</i>	44
3.4.2	Penentuan Tipe Elemen	44
3.4.3	Penentuan Sifat Material.....	45
3.4.4	<i>Boundary Condition</i>	46
3.4.5	Model Kontak dan Gesekan	48
3.4.6	Kontrol	49
3.4.7	Tipe Analisis	49
3.5	Langkah Penelitian.....	50
3.6	Variabel Penelitian	50

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1	Analisa Mekanis Sudut Serpih.....	51
4.1.1	Sudut Serpih 0°,15°, dan -15° Kedalaman Potong 1 mm	51
4.2	Analisa Mekanis Kedalaman Potong	59
4.2.1	Sudut Serpih 15° Kedalaman Potong 1.5 mm	60
4.3	Analisa Mekanis Tipe Pemotongan	64

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan	71
5.2	Saran	71

DAFTAR PUSTAKA xxi

LAMPIRAN

BIODATA PENULIS

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Proses Bubut	6
Gambar 2.2	Penamaan (<i>Nomenclature</i>) Pahat Kanan.....	6
Gambar 2.3	Sistem Kerja.....	8
Gambar 2.4	Proses Pemotongan <i>Orthogonal</i>	15
Gambar 2.5	Tipe 1, 2 dan 3 Chip dalam Urutan.....	18
Gambar 2.6	Perkiraan Sumber Panas dalam Tiga Daerah..	21
Gambar 2.7	Kondisi Batas Eulerian dan Lagrangian	23
Gambar 2.8	Penyempitan	24
Gambar 2.9	<i>Smoothing</i>	25
Gambar 2.10	Simulasi Proses Pemotongan Logam.....	28
Gambar 2.11	Pemisahan <i>Chip</i>	29
Gambar 2.12	Diagram Gaya Merchant.....	31
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	33
Gambar 3.2	Tampak Penuh dari Benda Kerja AISI 1018 <i>Mild Carbon Steel</i>	36
Gambar 3.3	Tampak Samping dari Benda Kerja AISI 1018 <i>Mild Carbon Steel</i>	37
Gambar 3.4	Perkakas dengan Sudut Potong Berbeda	37
Gambar 3.5	Tampak Penuh Perkakas Potong AISI T15 <i>High Speed Steel</i> dengan <i>Sudut Serpih</i> 0°	38
Gambar 3.6	Tampak Samping Perkakas Potong AISI T15 <i>High Speed Steel</i> dengan <i>Sudut Serpih</i> 0°	38
Gambar 3.7	Tampak Penuh Perkakas Potong AISI T15 <i>High Speed Steel</i> dengan <i>Sudut Serpih</i> -15° ..	39
Gambar 3.8	Tampak Samping Perkakas Potong AISI T15 <i>High Speed Steel</i> dengan <i>Sudut Serpih</i> -15° ..	39
Gambar 3.9	Tampak Penuh Perkakas Potong AISI T15 <i>High Speed Steel</i> dengan <i>Sudut Serpih</i> 15°	40
Gambar 3.10	Tampak Samping Perkakas Potong AISI T15 <i>High Speed Steel</i> dengan <i>Sudut Serpih</i> 15°	40
Gambar 3.11	<i>Orthogonal Cutting</i>	41
Gambar 3.12	<i>Oblique Cutting</i>	41
Gambar 3.13	Diagram Alir Permodelan	43

Gambar 3.14	<i>Meshing</i>	44
Gambar 3.15	Penentuan Material Properties dari Benda Kerja	45
Gambar 3.16	Penentuan Material Properties dari Perkakas Potong	46
Gambar 3.17	<i>Thermophysical Properties</i> dari Benda Kerja	46
Gambar 3.18	Pembuatan <i>Set Nodes</i>	47
Gambar 3.19	Menentukan <i>Boundary Conditions</i>	48
Gambar 3.20	Definisi Tipe Kontak	48
Gambar 4.1	Persebaran Tegangan Geser Sudut Serpih 0° Pada Awal Proses Pemotongan.....	52
Gambar 4.2	Persebaran Tegangan Geser Sudut Serpih 15° Pada Awal Proses Pemotongan.....	53
Gambar 4.3	Persebaran Tegangan Geser Sudut Serpih -15° Pada Awal Proses Pemotongan	53
Gambar 4.4	Persebaran Tegangan Geser Sudut Serpih 0° Pada Akhir Proses Pemotongan.....	54
Gambar 4.5	Persebaran Tegangan Geser Sudut Serpih 15° Pada Akhir Proses Pemotongan	55
Gambar 4.6	Persebaran Tegangan Geser Sudut Serpih -15° Pada Akhir Proses Pemotongan	56
Gambar 4.7	Perbandingan Gaya Potong Terhadap Waktu Sudut 0°	57
Gambar 4.8	Perbandingan Gaya Potong Terhadap Waktu Sudut 15°	58
Gambar 4.9	Perbandingan Gaya Potong Terhadap Waktu Sudut -15°	58
Gambar 4.10	Perbandingan Gaya Potong Terhadap Waktu dengan Tiga Sudut Serpih Berbeda	60
Gambar 4.11	Persebaran Tegangan Kedalaman 1.5mm Pada Awal Proses Pemotongan	61
Gambar 4.12	Persebaran Tegangan Kedalaman 1.5mm Pada Akhir Proses Pemotongan.....	62

Gambar 4.13	Perbandingan Gaya Potong Terhadap Waktu Kedalaman 1.5 mm	63
Gambar 4.14	Perbandingan Gaya Potong Terhadap Waktu Kedalaman Potong Berbeda.....	64
Gambar 4.15	Persebaran Tegangan Geser Pada Awal Proses Pemotongan <i>Oblique</i>	65
Gambar 4.16	Persebaran Tegangan Geser Pada Akhir Proses Pemotongan <i>Oblique</i>	66
Gambar 4.17	Perbandingan Gaya Potong Terhadap Waktu <i>Oblique Cutting</i>	67
Gambar 4.18	Perbandingan Gaya Potong Terhadap Waktu Dua Tipe Pemotongan	68

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Rekomendasi Kecepatan Potong untuk Bahan-Bahan Teknik Secara Umum.....	17
Tabel 3.1	Tabel Input dan Output Penelitian	34
Tabel 3.2	Standar Komposisi Kimia AISI T15 <i>High Speed Steel</i>	34
Tabel 3.3	Standar Komposisi Kimia AISI 1018 <i>Mild Carbon Steel</i>	33
Tabel 3.4	Properti dari AISI T15 <i>High Speed Steel</i>	35
Tabel 3.5	AISI 1018 <i>Mild Carbon Steel</i>	35
Tabel 3.6	Dimensi utama perkakas dan benda kerja.....	36
Tabel 4.1	Variasi Proses Pemotongan Logam	51
Tabel 4.2	Tegangan Maksimum Pada Awal Pemotongan ...	54
Tabel 4.3	Tegangan Maksimum Pada Akhir Pemotongan...	57
Tabel 4.4	Gaya Potong Pada Tiga Sudut Serpih	60
Tabel 4.5	Tegangan Maksimum Pada 1 mm dan 1.5 mm Sudut 15° Pada Awal Pemotongan	62
Tabel 4.6	Tegangan Maksimum Pada 1 mm dan 1.5 mm Sudut 15° Akhir Pemotongan.....	63
Tabel 4.7	Gaya Potong Pada Dua Kedalaman Potong	64
Tabel 4.8	Tegangan Maksimum Pada Awal Pemotongan <i>Oblique</i> dan <i>Orthogonal</i>	66
Tabel 4.9	Tegangan Maksimum Pada Akhir Pemotongan <i>Oblique</i> dan <i>Orthogonal</i>	67
Tabel 4.10	Gaya Potong Pada Tiga Sudut Serpih	68

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang

Pembubutan adalah salah satu proses manufaktur yang paling penting dan umum dalam industri pengolahan logam. Biaya produksi dalam industri pengolahan logam utamanya dicapai dengan pemilihan yang optimal dari semua faktor yang mempengaruhi proses pemotongan. Aplikasi komputer digital telah membawa perubahan revolusioner dalam domain dari berbagai ilmu teknik dan disiplin ilmu. Dalam beberapa tahun terakhir, analisis elemen hingga telah menjadi metode utama dalam simulasi pemotongan logam. Baru-baru ini sistem perangkat lunak yang dikembangkan berdasarkan metode elemen hingga dirancang khusus untuk simulasi proses pemotongan.

Sejumlah besar tegangan dihasilkan selama proses permesinan serta dalam proses yang berbeda dimana deformasi material terjadi. Temperatur yang dihasilkan pada permukaan alat potong ketika alat potong sedang dalam kontak dengan benda kerja disebut temperatur alat potong. Panas adalah parameter yang sangat mempengaruhi kinerja alat selama operasi. Sebagaimana diketahui daya yang dikonsumsi dalam pemotongan logam sebagian besar diubah menjadi panas. Temperatur yang meningkat selama pemotongan sebagai hasil dari panas utamanya bergantung pada kontak antara alat dan *chip*, jumlah dari gaya potong dan gesekan antara alat dan *chip*. Selama proses pembubutan deformasi sangat terkonsentrasi di zona yang sangat kecil dan temperatur yang dihasilkan di zona deformasi mempengaruhi benda kerja dan alat. Keausan alat, umur alat, keutuhan permukaan benda kerja, mekanisme pembentukan *chip* sangat dipengaruhi oleh temperatur pemotongan yang tinggi dan berkontribusi terhadap deformasi termal dari alat potong, yang mana dianggap sebagai sumber terbesar dari kesalahan dalam proses permesinan.



BAB I PENDAHULUAN

Telah cukup banyak penelitian yang ditujukan untuk mengembangkan model analitis dan model numerik untuk mensimulasikan proses pemotongan logam untuk memprediksi efek dari variabel bubut seperti kecepatan, *feed*, kedalaman pemotongan dan juga geometri alat dalam deformasi. Terutama, model numerik sangat penting dalam memprediksi pembentukan *chip*, komputasi kekuatan, distribusi regangan, laju regangan, temperatur dan tekanan di ujung alat potong dan permukaan benda yang dibubut. Teknik simulasi proses yang canggih diperlukan untuk mempelajari pengaruh geometri ujung alat potong dan kondisi pemotongan dalam keutuhan permukaan terutama pada pembubutan yang menginduksi tegangan. Tujuannya adalah untuk menganalisis distribusi temperatur pada alat dengan material yang berbeda dengan berbagai parameter *machining* menggunakan perangkat lunak LS-Dyna dan metode *Smooth Particle Hydrodynamics* (SPH).

I.2. Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan diteliti oleh penulis dalam penelitian dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana perbandingan tegangan dan gaya potong pada sebuah perkakas potong *single point* di berbagai parameter pembubutan?
2. Bagaimana perbandingan tegangan dan gaya potong dua tipe pemotongan berbeda dari alat potong *single point*?

I.3. Batasan Masalah

Untuk mendapatkan hasil perhitungan yang sesuai dengan referensi yang ada serta agar tidak menyimpang dari permasalahan yang akan ditinjau, maka terdapat beberapa batasan masalah yang perlu diperhitungkan yaitu:

1. Material isotropik dan homogen.
2. Keausan pahat diabaikan



BAB I PENDAHULUAN

3. Temperatur benda kerja dianggap tidak berubah
4. Kondisi permesinan kering digunakan pada simulasi ini
5. Radius mata pahat adalah 0.2 mm.

1.4. Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian tugas akhir ini, yaitu antara lain :

1. Menganalisis perbandingan dari tegangan dan gaya potong pada sebuah perkakas potong *single point* di berbagai parameter pembubutan.
2. Menganalisis perbandingan tegangan dan gaya potong dua tipe pemotongan berbeda dari alat potong *single point*.

1.5. Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah mengaplikasikan ilmu material dan metalurgi yang telah dipelajari di bangku kuliah sebagai dasaran dalam penelitian ini dan dapat sebagai alternatif pengujian eksperimental karena dilakukan dengan software. Selain itu, dengan mengetahui gaya potong dari proses simulasi maka dapat ditentukan daya potong yang diperlukan dari proses permesinan dan juga dengan mengetahui tegangan geser maka dapat ditentukan bentuk perkakas potong terbaik yang menghasilkan nilai tegangan paling rendah dalam proses permesinan.



(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

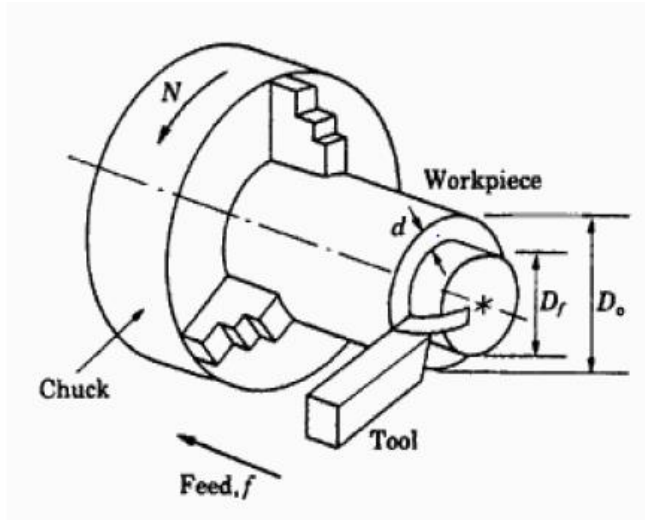
2.1. Proses Pemotongan Logam

Proses pemotongan dengan logam merupakan suatu proses yang digunakan untuk mengubah bentuk suatu produk dari logam (komponen mesin) dengan cara memotong. Prinsip pemotongan logam dapat didefinisikan sebagai sebuah aksi dari alat potong yang dikontakkan dengan sebuah benda kerja untuk membuang permukaan benda kerja tersebut dalam bentuk geram (Yuliarman, 2008).

Proses bubut merupakan satu diantara 7 (tujuh) jenis proses pemesinan yang digunakan pada pemotongan logam. Dalam prosesnya digunakan mesin bubut yang memiliki *chuck* atau pencekam dan berputar pada sebuah sumbu, alat potong bergerak arah aksial terhadap benda kerja sehingga terjadi pemotongan dan menghasilkan permukaan yang konsentris dengan sumbu putar benda kerja. Proses pembubutan biasanya digunakan untuk memproses benda kerja dengan hasil atau bentuk penampang lingkaran atau benda kerja berbentuk silinder (Fajar Kurniawan, 2008). Gambar 2.1 adalah skematis dari sebuah proses bubut dengan n adalah putaran poros utama, f adalah pemakanan, dan a adalah kedalaman potong.

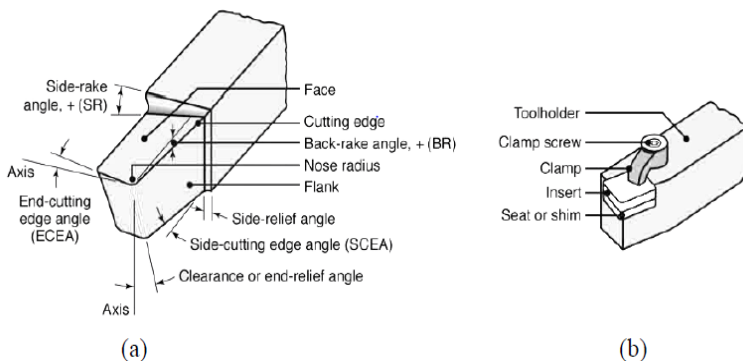


BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Gambar 2.1 Proses Bubut (Sumber : Gutowski, 2009)

Bagian-bagian serta penamaan (*nomenclature*) dari alat potong yang digunakan pada proses bubut dijelaskan pada Gambar 2.2. Radius pahat potong menghubungkan sisi dengan ujung potong (*cutting edge*) dan berpengaruh terhadap umur pahat, gaya radial, dan permukaan akhir.



Gambar 2.2 Penamaan (*Nomenclature*) Pahat Kanan



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Ada tiga parameter utama yang mempengaruhi gaya potong, peningkatan panas, keausan, dan integritas permukaan benda yang dihasilkan. Ketiga parameter itu adalah kecepatan potong (v), pemakanan (f), dan kedalaman potong (a). Kecepatan potong adalah kecepatan keliling benda kerja dengan satuan (m/min). Pemakanan adalah perpindahan atau jarak tempuh pahat tiap satu putaran benda kerja (mm/rev). Kedalaman potong merupakan tebal material terbuang pada arah radial (mm).

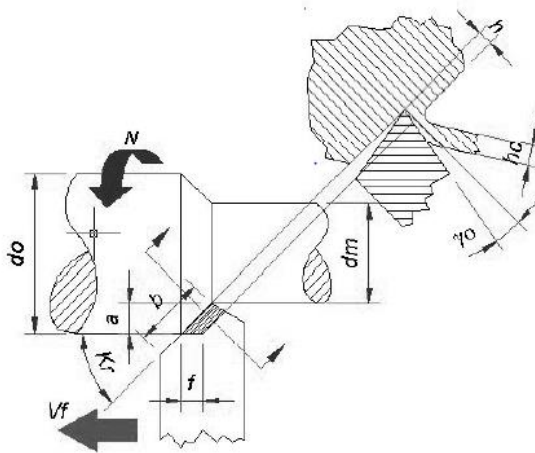
Menurut Rochim (1993), kecepatan pembuangan geram dapat dipilih agar waktu pemotongan sesuai dengan yang dikehendaki. Hal ini dimaksudkan agar produktivitas permesinan dapat optimal. Untuk itu perlu dipahami lima elemen dasar proses permesinan, yaitu:

1. Kecepatan potong (*cutting speed*) : v (m/min)
2. Kecepatan makan (*feeding speed*) : vf (mm/min)
3. Kedalaman potong (*depth of cut*) : a (mm)
4. Waktu pemotongan (*cutting time*) : t_c (min)
5. Kadar pembuangan material (*rate of metal removal*) : Z (cm³/min)

Kelima elemen proses permesinan di atas dihitung berdasarkan dimensi benda kerja, pahat serta besaran dari mesin yang digunakan. Dikarenakan besaran mesin pemotongan logam yang dapat diatur ada bermacam-macam dan bergantung pada jenis mesin pemotong, maka rumus yang digunakan untuk menghitung setiap elemen proses permesinan dapat berlainan. Untuk proses bubut elemen dasarnya dapat diketahui dengan memperhatikan gambar di bawah ini :



BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Gambar 2.3 Sistem Kerja (Sumber : Rochim, 1993)

Benda Kerja	:	d_o	: diameter awal ; mm
	:	d_m	: diameter luar ; mm
	:	l_t	: panjang pemesinan ; mm
Pahat	:	κ_r	: sudut potong utama ; °
	:	γ_o	: sudut geram ; °
Mesin bubut	:	a	: kedalaman potong
	:	a	: $\frac{d_o - d_m}{2}$ (mm)
	:	f	: pemakanan (mm/putaran)
	:	n	: putaran poros utama (rpm)

Dari Gambar 2.3 terlihat bahwa proses bubut tersebut menggunakan suatu proses pemotongan miring (*oblique cutting*) yaitu suatu sistem pemotongan dengan gerakan relatif antara pahat dan benda kerja membentuk sudut potong utama κ_r kurang dari 90°. Kecepatan makan v_f dihasilkan oleh pergerakan dari pahat ke benda kerja. Elemen dasar dapat dihitung dengan rumus-rumus berikut :



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

1. Kecepatan Potong

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}; \text{ m / min} \dots\dots\dots(1)$$

Dimana : v : kecepatan potong ; m/min
 d : diameter rata-rata
 d = (d₀+ d_m) /2 ≈ d₀ ; mm
 n : putaran poros utama ; rpm

Kecepatan potong maksimal yang diizinkan tergantung pada :

- Bahan benda kerja : makin tinggi kekuatan bahan, makin rendah kecepatan potong.
- Bahan pahat : pahat karbida memungkinkan kecepatan yang lebih tinggi dari pada pahat HSS.
- Besar asutan : makin besar gerak makan, makin rendah kecepatan potong.
- Kedalaman potong : makin besar kedalaman potong, makin rendah kecepatan potong.

2. Kecepatan Pemakanan

$$vf = f \cdot n ; \text{ mm/min} \dots\dots\dots(2)$$

dimana : vf : kecepatan makan ; mm/min
 f : gerak makan ; mm/rev
 n : putaran poros utama (benda kerja); rpm

3. Waktu Pemotongan

$$tc = lt / vf ; \text{ mi} \dots\dots\dots(3)$$

dimana : tc : waktu pemotongan ; min
 lt : panjang pemesinan ; mm
 vf: kecepatan makan ; mm/min

4. Kecepatan Penghasilan Geram

Kecepatan penghasil geram dapat dihitung dengan formula :

$$Z = A \cdot v \dots\dots\dots(4)$$

dimana,
penampang geram sebelum terpotong A = f . a ; mm²
maka Z = f . a . v



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

dimana,

Z : kecepatan penghasilan geram ; cm^3 / min

f : gerak makan ; mm/rev

a : kedalaman potong ; mm

Pada Gambar 2.3 diperlihatkan sudut potong utama (κr , *principal cutting edge angle*) yaitu merupakan sudut antara mata potong mayor dengan kecepatan makan vf. Untuk harga a dan f yang tetap maka sudut ini menentukan besarnya lebar pemotongan. (b, *width of cut*) dan tebal geram sebelum terpotong (h, *underformed chip thickness*) sebagai berikut:

a. Lebar pemotongan : $b = a / \sin \kappa r$; mm

b. Tebal geram sebelum terpotong : $h = f \sin \kappa r$; mm

Dengan demikian penampang geram sebelum terpotong dapat dituliskan sebagai berikut :

$$A = f \cdot a = b \cdot h \text{ ; mm}^2 \dots\dots\dots(5)$$

Perlu dicatat bahwa tebal geram sebelum terpotong (h) belum tentu sama dengan tebal geram (h_c , *chip thickness*) dan hal ini antara lain dipengaruhi oleh sudut geram, kecepatan potong dan material benda kerja.

2.2. Bahan Pahat

Prinsip dasar pemesian adalah kemampuan ketangguhan (*toughness*) pahat terhadap benda kerja. Banyak perkembangan pada bahan pahat guna meningkatkan kemampumesinan dimana geometri dan bahan pahat merupakan hal yang perlu di pertimbangkan. Syarat bahan pahat yang harus dipenuhi mencakup:

- Kekerasan terutama pengerasan karena panas, dengan tujuan untuk menjaga temperatur pemotongan dan mencegah perubahan bentuk plastik (*Plastic Deformation*).
- Ketangguhannya harus dapat menahan beban yang tiba-tiba.
- Rendah penyerapan (*solubility*) pahat terhadap unsur benda kerja untuk mencegah aus pahat. (Schey, 2000).
- Tahan aus untuk mendapatkan umur pahat yang panjang dan



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

e. Kemampuan kesetimbangan secara kimia terhadap pengaruh benda kerja (Kalpakjian, 1995).

Dalam suatu pemesinan jenis pekerjaan pemesinan yang tertentu diperlukan pahat dari jenis material yang cocok. Keterbatasan kemampuan suatu jenis material pahat perlu diperhitungkan. Berikut adalah pahat yang sering digunakan menurut urutannya mulai dari material yang relatif lunak sampai dengan yang paling keras sebagai berikut :

1. Baja Karbon Tinggi (*High Carbon Steel, Carbon Tool Steels, CTS*)
2. HSS (*High Speed Steels, Tool Steels*)
3. Paduan Cor Non logam (*Cast Nonferrous Alloys, Cast Carbides*)
4. Karbida (*Cermeted Carbides, Hardmetals*)
5. Keramik (*Ceramic*)
6. CBN (*Cubic Boron Nitride*)
7. Intan (*Sintered Diamonds & Natural Diamonds*)

2.2.1. Pahat HSS (High Speed Steels)

Pahat bubut *High Speed Steels* (HSS) merupakan paduan dari 0,75%-1,5% *Carbon*(C), 4%-4,5% *Chromium* (Cr), 10%-20% *Tungsten* (W) dan *Molybdenum* (Mo), 5% lebih *Vanadium* (V), dan *Cobalt* (Co) lebih dari 12% (Childs, dkk, 2000). Pahat HSS dapat digolongkan menjadi tiga kelompok yaitu; *high speed steel, molybdenum high speed steel*, dan *superhigh speed steel*. Peningkatan kekerasan permukaan HSS dan ketahanan aus dapat dilakukan dengan pelapisan. Beberapa material pelapis di antaranya: tungsten karbida, titanium karbida, dan titanium nitrida, dengan tebal pelapisan 5-8 μm (Boothroyd, 1975). Peningkatan kekerasan HSS dapat dilakukan dengan di *quenching*, kekerasannya 52-63 HRC. Untuk HSS yang dipanaskan pada temperatur 1175-1230°C dan di *quenching* dengan oli, kemudian di-temper pada temperatur 550-580°C, kekerasannya meningkat sampai 63-65 HRC. (Leslie, 1983)



2.3. Bahan Material

2.3.1 Logam Ferro

Bahan logam ferro adalah suatu logam yang memiliki dasar paduan besi (*ferrous*), sedangkan unsur lain hanyalah sebagai unsur tambahan untuk mendapatkan sifat bahan sesuai dengan aplikasi dalam penggunaannya. Bahan logam ferro diantaranya adalah:

1. Besi Tempa (*Wrought Iron*)
2. Baja Karbon (*Carbon Steel*)
3. Baja Paduan
4. Baja dan Besi Tuang

Logam mempunyai beberapa sifat antara lain: sifat mekanis, sifat fisika, sifat kimia dan sifat pengerjaan. Sifat mekanis adalah kemampuan suatu logam untuk menahan beban yang diberikan pada logam tersebut. Pembebanan yang diberikan dapat berupa pembebanan statis (besar dan arahnya tetap), ataupun pembebanan dinamis (besar dan arahnya berubah). Yang termasuk sifat mekanis pada logam, antara lain: kekuatan bahan (*strength*), kekerasan, elastisitas, kekakuan, plastisitas, kelelahan bahan, sifat fisika, sifat kimia, dan sifat pengerjaan.

Kekuatan (*strength*) adalah kemampuan material untuk menahan tegangan tanpa kerusakan. Beberapa material seperti baja struktur, besi tempa, alumunium, dan tembaga mempunyai kekuatan tarik dan tekan yang hampir sama. Ukuran kekuatan bahan adalah tegangan maksimumnya, atau gaya terbesar persatuan luas yang dapat ditahan bahan tanpa patah. Untuk mengetahui kekuatan suatu material dapat dilakukan dengan pengujian tarik, tekan, atau geser. Kekerasan (*hardness*) adalah ketahanan suatu bahan untuk menahan pembebanan yang dapat berupa goresan atau penekanan. Kekerasan merupakan kemampuan suatu material untuk menahan takik atau kikisan. Kekakuan adalah ukuran kemampuan suatu bahan untuk menahan perubahan bentuk atau deformasi setelah diberi beban. Kelelahan bahan adalah kemampuan suatu bahan untuk menerima beban



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

yang berganti-ganti dengan tegangan maksimum diberikan pada setiap pembebanan.

Elastisitas adalah kemampuan suatu bahan untuk kembali ke bentuk semula setelah menerima beban yang mengakibatkan perubahan bentuk. Elastisitas merupakan kemampuan suatu material untuk kembali ke ukuran semula setelah gaya dari luar dilepas. Elastisitas ini penting pada semua struktur yang mengalami beban yang berubah-ubah terlebih pada alat-alat dan mesin-mesin presisi.

Plastisitas adalah kemampuan suatu bahan padat untuk mengalami perubahan bentuk tetap tanpa ada kerusakan. Sifat fisika adalah karakteristik suatu bahan ketika mengalami peristiwa fisika seperti adanya pengaruh panas atau listrik. Yang termasuk sifat-sifat fisika adalah sebagai berikut: Titik lebur, Kepadatan, Daya hantar panas, dan daya hantar listrik. Sifat kimia adalah kemampuan suatu logam dalam mengalami peristiwa korosi. Korosi adalah terjadinya reaksi kimia antara suatu bahan dengan lingkungannya. Secara garis besar ada dua macam korosi, yaitu korosi karena efek galvanis dan reaksi kimia langsung.

2.3.2 Baja

Baja adalah besi karbon campuran logam yang dapat berisi konsentrasi dari element campuran lainnya, ada ribuan campuran logam lainnya yang mempunyai perlakuan bahan dan komposisi berbeda. Sifat mekanis adalah sensitif kepada isi dari pada karbon, yang mana secara normal kurang dari 1% C. Sebagian dari baja umum digolongkan menurut konsentrasi karbon, yakni ke dalam rendah, medium dan jenis karbon tinggi. Baja merupakan bahan dasar vital untuk industri. Semua segmen kehidupan, mulai dari peralatan dapur, transportasi, generator pembangkit listrik, sampai kerangka gedung dan jembatan menggunakan baja. Besi baja menduduki peringkat pertama diantara barang tambang logam dan produknya melingkupi hampir 90 % dari barang berbahan logam.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berdasarkan tinggi rendahnya prosentase karbon di dalam baja, baja karbon diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Baja Karbon Rendah (*low carbon steel*)

Baja karbon rendah mengandung karbon antara 0,10 s/d 0,30 %. Baja karbon ini dalam perdagangan dibuat dalam plat baja, baja strip dan baja batangan atau profil. Berdasarkan jumlah karbon yang terkandung dalam baja, maka baja karbon rendah dapat digunakan atau dijadikan baja-baja sebagai berikut:

- Baja karbon rendah yang mengandung 0,04 % - 0,10% C untuk dijadikan baja – baja plat atau strip.
- Baja karbon rendah yang mengandung 0,05% C digunakan untuk keperluan badan-badan kendaraan.
- Baja karbon rendah yang mengandung 0,15% - 0,30% C digunakan untuk konstruksi jembatan, baja konstruksi, atau membuat baut.

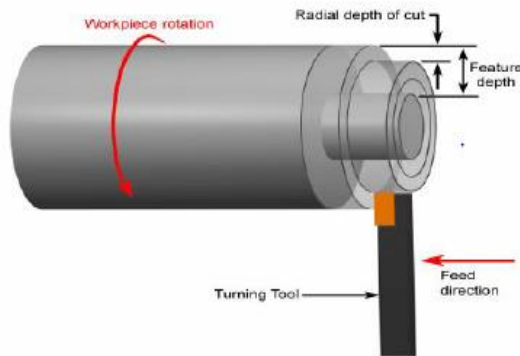
2.3.3 Proses Permesinan Untuk Baja

Besi kasar diproduksi dengan menggunakan dapur biji besi yang berisi kokas pada lapisan paling bawah, kemudian batu kapur dan biji besi. Kokas terbakar dan menghasilkan gas CO yang naik ke atas sambil mereduksi oksida besi. Besi yang telah tereduksi melebur dan terkumpul di bawah menjadi besi kasar yang biasanya mengandung *Karbon (C)*, *Mangan (Mn)*, *silicon (Si)*, *nikel (Ni)*, *fospor (P)*, *belerang (S)*. Kemudian leburan besi dipindahkan ke tungku lain (*converter*) dan dihirup gas oksigen untuk mengurangi kandungan karbon. Untuk menghilangkan kembali kandungan oksigen dalam baja cair ditambahkan AL, Si, Mn proses ini disebut oksidasi. Setelah dioksidasi, baja cair dialirkan dalam mesin cetakan kontinu berupa slap atau di cor dalam cetakan berupa ingot. Slap dan ingot itu diproses dengan penempaan panas *rolling* panas, penempaan dingin, perlakuan panas, pengerasan permukaan, dan lain-lain untuk dibentuk menjadi sebuah produk atau kerangka dasar dari sebuah produk.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Proses pemesinan yang menggunakan perkakas potong bermata tunggal, mekanismenya adalah dengan memotong bagian dari benda kerja bentuk silinder yang berputar. Perkakas dihantarkan secara linier, sejajar dengan sumbu rotasi. Proses pemesinan berdasarkan bentuk benda kerja ada dua, yaitu bentuk bulat (*silindris*) dan berbagai bentuk *non-silindris*. Proses pembuatan dilakukan dengan cara memotong sebagian benda kerja yang berputar pada mesin sementara pisau potongnya diam.



Gambar 2.4 Proses Pemotongan *Orthogonal* (Sumber : Rochim, 1993)

Analisis mekanisme pembentukan geram tersebut dikemukakan oleh Merchant berdasarkan teorinya atas model pemotongan sistem tegak (*orthogonal system*). Sistem pemotongan tegak merupakan penyederhanaan dari sistem pemotongan miring (*oblique system*) dimana gaya diuraikan menjadi komponen gaya yang bekerja pada suatu bidang. Pemotongan tegak (*Orthogonal cutting*) merupakan suatu sistem pemotongan dengan gerakan relatif antara mata pahat dan benda kerja membentuk sudut potong tepat 90° atau yang dinamakan dengan sudut potong utama (K_r), dan besarnya lebar mata pahat



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

lebih besar dari lebar benda kerja yang akan dipotong. Menurut Rochim(1993), sudut potong utama (K_r) mempunyai peran antara lain :

1. Menentukan lebar dan tebal geram sebelum terpotong (b dan h)
2. Menentukan panjang mata potong yang aktif atau panjang kontak antara geram dengan bidang pahat, dan
3. Menentukan besarnya gaya.

Untuk kedalaman potong a dan gerak makan f yang tetap, maka dengan memperkecil sudut potong utama (K_r) akan menurunkan tebal geram sebelum terpotong h dan menaikkan lebar geram b . Akan tetapi, pemakaian sudut potong utama yang kecil tidak selalu menguntungkan sebab akan menaikkan gaya radial F_x . Gaya radial yang besar mungkin menyebabkan lenturan yang terlalu besar ataupun getaran (*chatter*) sehingga menurunkan ketelitian geometrik produk dan hasil pemotongan terlalu kasar. Tergantung pada kekakuan (*stiffness*) benda kerja dan pahat serta metode pencekaman benda kerja serta geometri benda kerja.

Sudut geram mempengaruhi proses pembentukan geram pada proses pemotongan orthogonal. Untuk suatu kecepatan potong tertentu, sudut geram yang besar akan menurunkan rasio pemampatan tebal geram (λh) yang mengakibatkan kenaikan sudut geser (Φ). Jenis material benda kerja juga akan mempengaruhi pemilihan sudut geram. Pada prinsipnya, untuk material yang lunak dan ulet (*soft and ductile*) memerlukan sudut geram yang besar untuk mempermudah proses pembentukan geram, sebaliknya bagi material yang keras dan rapuh (*hard and brittle*) memerlukan sudut geram yang kecil atau negatif untuk memperkuat pahat.

Kecepatan pemotongan dan jarak pemakanan (*Cutting speed and feed rate*) salah satu aspek penting dalam proses pemotongan untuk pembentukan benda kerja pada mesin perkakas ialah penentuan kesesuaian kecepatan pemotongan (*cutting speed*) dan jarak pemotongan (*feed*). Hal ini dikarenakan bahwa aspek tersebut sangat berpengaruh terhadap efisiensi dan kualitas proses produksi yang kita lakukan.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Cutting Speed (kecepatan pemotongan) dapat didefinisikan sebagai kecepatan keliling atau permukaan dari benda kerja atau alat potong yang diukur pada meter per menit. Faktor ini akan diterapkan dalam menentukan putaran spindle mesin atau alat potong dalam putaran per menit (*revolution per minute /rpm.*). Pengaruh *Cutting Speed* (kecepatan pemotongan) terhadap umur pakai alat potong Kesesuaian dalam memilih kecepatan potong sangat sangat menentukan efisiensi kerja dan pemakaian alat potong, pada kecepatan potong yang lebih tinggi akan mereduksi ketahanan dan umur pakai dari alat potong yang kita gunakan dan jika kecepatan pemotongan diturunkan ada kecenderungan memperpanjang umur pakai dari alat potong tersebut. Sebuah estimasi umur pakai pahat bubut HSS diperlihatkan pada gambar 2.4, dimana pahat bubut tersebut digunakan selama 60 menit dalam pekerjaan biasa dan selama 240 menit digunakan untuk *set-up tool* dan persiapan lainnya. Pada grafik memperlihatkan curve umur pakai pahat bubut HSS dalam pemakaian biasa dengan dasar umur pakai pahat tersebut selama 60 menit.

Tabel 2.1 Rekomendasi Kecepatan Potong untuk Bahan-Bahan Teknik Secara Umum

Material	Ballpark CS With High- Speed Tool (rpm)	Cutting Speed High- Speed Tool (rpm)	Cutting Speed Carbide Tool (rpm)
SAE 1020-Low Carbon Steel	100	80-120	300-400
SAE 1050-High Carbon Steel	60	60-100	200
Stanless Steel	100	100-120	240-300
Alumunium	250	400-700	800-1000
Brass & Bronze	200	110-300	600-1000



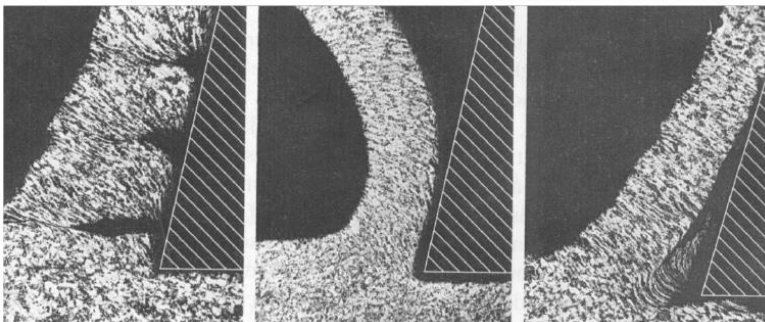
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Plastics	500	500	1000
----------	-----	-----	------

Mekanisme pembentukan geram logam yang pada umumnya bersifat ulet (*ductile*) apabila mendapat tekanan akan timbul tegangan (*stress*) di daerah sekitar konsentrasi gaya penekanan mata potong pahat. Tegangan pada logam (benda kerja) tersebut mempunyai orientasi yang kompleks dan pada salah satu arah akan terjadi tegangan geser (*shearing stress*) yang maksimum. Apabila tegangan geser ini melebihi kekuatan logam akan terjadi *deformasi plastik* (perubahan bentuk) yang menggeser dan memutuskan benda kerja diujung pahat pada suatu bidang geser (*shear plane*).

2.4. Bentuk Chip

Ada tiga jenis chip yang berbeda yang disebutkan dalam literatur seperti yang pertama kali didokumentasikan oleh Ernst dan mereka adalah: Tipe 1: Chip terputus-putus atau *Segmented*, Tipe 2: Chip terus menerus dan halus dan Tipe 3: Chip terus menerus dengan tepi tegak (BUE) dari bahan chip antara alat dan chip (Payton, 2000)



Gambar 2.5 Tipe 1, 2 dan 3 Chip dalam Urutan.

Karena tekanan yang besar akibat gaya pemotongan serta temperatur yang tinggi maka permukaan aktif dari pahat akan



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

mengalami keausan. Keausan tersebut makin lama makin membesar yang selain memperlemah pahat juga akan memperbesar gaya pemotongan sehingga dapat menimbulkan kerusakan fatal (Rochim, 1993).

Kerja atau mekanik dalam proses pemotongan yang bebas getaran seluruhnya diubah menjadi panas/kalor. Energi mekanik persatuan waktu atau daya mekanik yang diubah menjadi energi panas persatuan waktu tersebut dapat dituliskan sebagai berikut :

$$Q = Q_{sh} + Q_{\gamma} + Q_a ; W \dots\dots\dots(6)$$

Dimana :

Q = Panas total yang dihasilkan perdetik

Q_{sh} = Panas yang dihasilkan perdetik pada bidang geser

Q_{γ} = Panas yang dihasilkan perdetik pada bidang geram

Q_a = Panas yang dihasilkan perdetik pada bidang utama

Berdasarkan hasil penelitian pada berbagai kondisi pemotongan, prosentase panas yang dihasilkan pada bidang geser, bidang geram dan bidang utama masing-masing berkisar diantara harga 60%, 30% dan 10%. Panas tersebut sebagian akan terbawa oleh gram, sebagian mengalir menuju kepahat dan benda kerja dengan presentase sebagai berikut :

$$Q = Q_c + Q_s + Q_w ; W \dots\dots\dots(7)$$

Dimana :

Q_c = Panas yang terbawa oleh gram dengan prosentase sekitar 60% 37

Q_s = Panas yang merambat melalui pahat dengan prosentase sekitar 30 %

Q_w = Panas yang merambat melalui benda kerja dengan prosentase 10%

Gambar 2.5 menunjukkan prosentase panas pada proses pembubutan sebagai fungsi dari kecepatan potong. Semakin tinggi kecepatan potong semakin besar prosentase panas yang terbawa oleh geram.

Panas total yang ditimbulkan permenit dihitung dari rumus berikut :

$$Q = k_s . A . v ; J/min \dots\dots\dots(8)$$



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dimana : $k_s \cdot A = F_v$ = gaya potong; N

k_s = gaya potong spesifik; N/mm²

A = penampang geram; mm²

V = kecepatan potong; m/min

Panas yang terbawa oleh geram adalah :

$$Q_c = \Delta\theta_c \cdot W \cdot c_w ; \text{J/mi} \dots\dots\dots(9)$$

Dimana :

$\Delta\theta_c$ = kenaikan temperatur geram ; °K

W = berat geram yang terbentuk per menit; g/min

$$Z \cdot \rho_w = A \cdot V \cdot \rho_w \dots\dots\dots(10)$$

Dimana :

z = Kecepatan pembentukan geram ; cm³ / min

ρ_w = Berat spesifikasi material (benda kerja); g/cm³

c_w = Panas spesifikasi benda kerja; j/(g.K)

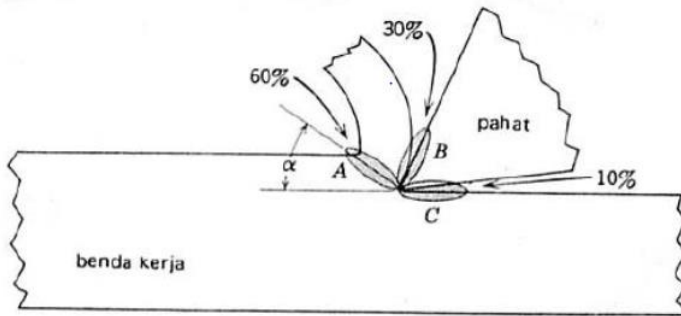
$$\eta_q = \frac{Q_c}{Q} = \frac{\Delta\theta_c \cdot A \cdot v \cdot \rho_w \cdot c_w}{k_s \cdot A \cdot v \cdot Q}$$

$$\eta_q = \frac{\Delta\theta_c \cdot \rho_w \cdot c_w}{k_s} = \frac{\Delta\theta_c \cdot C \cdot v \cdot w}{k_s}$$

Dengan demikian temperatur geram relatif terhadap benda kerja paling tinggi hanya akan mencapai :

$$\Delta\theta_c = \frac{k_s}{C \cdot v \cdot w}$$

Meskipun presentase panas yang terbawa geram sangat tinggi tidak berarti bahwa temperatur geram menjadi lebih tinggi dari pada temperatur pahat. Panas mengalir bersama-sama geram yang selalu terbentuk dengan kecepatan tertentu, sedangkan panas yang merambat melalui pahat terjadi sebagai proses konduksi panas yang mempengaruhi oleh konduktifitas panas material pahat serta penampang pahat yang relatif kecil. Dengan demikian temperatur rata-rata pahat akan lebih tinggi (kurang lebih dua kalinya) dari pada temperatur rata-rata geram (Rochim, 1993).



Gambar 2.6 Perkiraan Sumber Panas dalam Tiga Daerah, A. Bidang Geser, B. Bidang Gesek, C. Bidang Permukaan (Hogmark, 2005)

Gambar 2.5 menunjukkan temperatur pahat (pada bidang geram yang bergesekan dengan geram) temperatur rata-rata geram, serta temperatur benda kerja, sebagai fungsi dari kecepatan potong dalam proses pembubutan. Distribusi temperatur pada ujung pahat yang baru saja terbentuk maka dapat disimpulkan bahwa temperatur tertinggi terjadi pada bidang geram pada daerah agak jauh dari mata potong yaitu disekitar lokasi dimana geram yang melengkung mulai berpisah dengan permukaan pahat (Kalpakjian, 2003).

2.5 Metode Elemen Hingga Proses Pemotongan

Penelitian pemotongan logam fokus pada penentuan kondisi pemotongan terbaik dan geometri alat untuk efisiensi proses. Pengujian eksperimen diperlukan untuk mendapatkan hasil tetapi hal tersebut mahal dan memakan waktu. Selain ini, metode analisis sederhana memiliki aplikasi yang terbatas dan mereka tidak dapat digunakan untuk proses pemotongan yang kompleks. Pada titik ini metode numerik menjadi penting. Dalam dua dekade terakhir, metode elemen hingga (FEM) \ paling sering digunakan dalam analisis pemotongan logam. Berbagai output



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

dan karakteristik dari proses pemotongan logam seperti memotong kekuatan, tekanan, temperatur, bentuk chip dll dapat diprediksi dengan menggunakan FEM tanpa melakukan eksperimen. Tiga formulasi utama yang digunakan dalam simulasi elemen hingga pemotongan logam: Lagrangian, Eulerian dan Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE).

2.5.1 Lagrangian

Formulasi Lagrangian terutama digunakan dalam masalah mekanika padat. Di sini *mesh* FE terikat ke benda kerja dan mencakup seluruh daerah di bawah analisis. Hal ini membuatnya sangat disukai ketika aliran tak terbatas dari material terlibat. Formulasi Lagrangian secara luas digunakan dalam simulasi pemotongan logam karena kemampuan untuk menentukan geometri chip dari tahap awal hingga kondisi *steady state* dan geometri ini merupakan fungsi dari parameter pemotongan, proses deformasi plastik dan sifat bahan. Oleh karena itu, batas-batas dan bentuk chip tidak harus diketahui. Selain itu, kriteria pemisahan chip dapat didefinisikan untuk mensimulasikan chip diskontinyu atau kerusakan material dalam model pemotongan logam yang didasarkan pada formula Lagrangian.

Meskipun ada banyak keuntungan dari formulasi Lagrangian, ada juga kekurangannya. Logam dipotong terkena deformasi plastik parah dan menyebabkan distorsi dari elemen. Oleh karena itu, regenerasi mesh diperlukan. Kedua, kriteria pemisahan chip harus disediakan. Kelemahan ini dapat dihilangkan dengan menggunakan formulasi *Lagrangian* diperbarui dengan *mesh* adaptivity atau teknik *remeshing* otomatis.

2.5.2 Eulerian

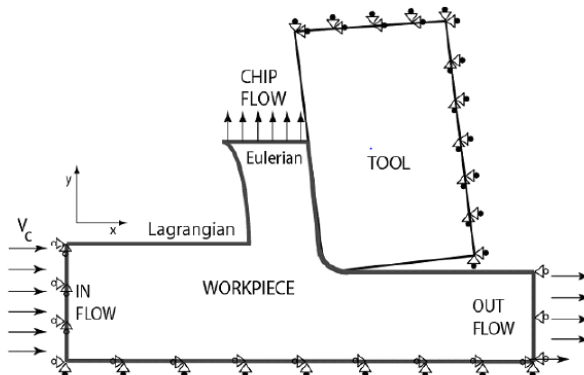
Dalam formulasi Eulerian, spasialitas FE *mesh* diperbaiki dan aliran material melalui kontrol volume yang menghilangkan distorsi elemen selama proses. Selain itu, unsur-unsur yang lebih sedikit diperlukan untuk analisa, sehingga mengurangi waktu

perhitungan. Simulasi pemotongan dari *steady state* dan oleh karena itu tidak perlu untuk kriteria pemisahan dalam model Eulerian.

Kelemahan formulasi Eulerian adalah kebutuhan dalam menentukan batas-batas dan bentuk chip sebelum simulasi. Juga ketebalan *chip* alat-chip panjang kontak dan kondisi kontak antara alat-*chip* harus dijaga konstan selama analisis yang membuat formulasi Eulerian tidak sesuai dengan proses deformasi nyata selama pemotongan logam.

2.5.3 Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)

Fitur terbaik dari formulasi Lagrangian dan Eulerian telah digabungkan dan disebut Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE). Dalam formulasi ALE, *mesh* FE tidak spasialitas tetap atau terikat pada bahan benda kerja. *Mesh* mengikuti aliran material dan masalah untuk perpindahan terpecahkan pada langkah Lagrangian, sedangkan *mesh* diposisikan ulang dan masalah untuk kecepatan terpecahkan di langkah Eulerian.



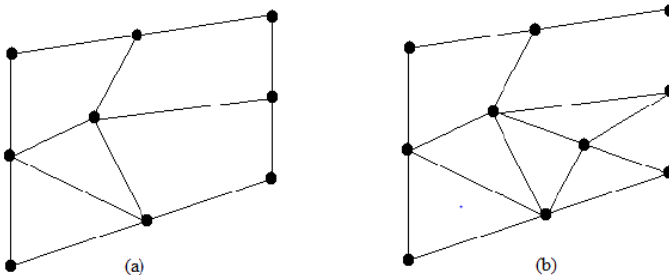
Gambar 2.7. Kondisi Batas Eulerian dan Lagrangian dalam Simulasi ALE (Sumber: Ozel, et al. 2007)



2.5.4 *Meshing*

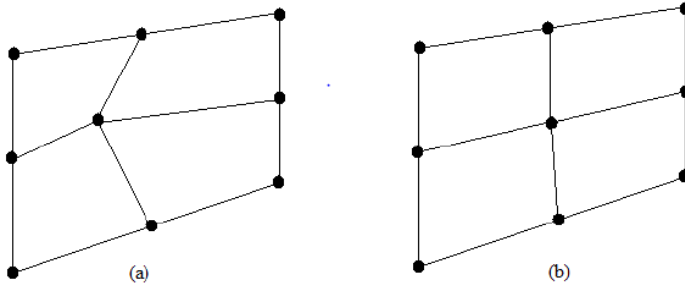
Suatu wilayah kontinyu dibagi wilayah diskrit yang disebut elemen dalam analisis FE. Prosedur ini disebut diskritisasi atau *meshing*. Awal rancangan FE *mesh* tidak bisa terus menjaga bentuk aslinya dan terdistorsi karena deformasi plastik parah selama pemotongan logam atau proses pembentukan logam. distorsi menyebabkan laju konvergensi dan kesalahan numerik. Untuk menangani masalah ini FE *mesh* baru harus dihasilkan dalam arti mengubah ukuran dan distribusi *mesh*. Ini disebut prosedur *mesh adaptif*.

Salah satu prosedur *mesh adaptif* adalah teknik *remeshing* dan itu termasuk generasi dari FE *mesh* baru dari *mesh* terdistorsi yang ada. Kedua adalah yang disebut teknik perbaikan yang didasarkan pada peningkatan kerapatan *mesh* lokal dengan mengurangi ukuran elemen lokal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7



Gambar 2.8. Penyempitan: (a) *Mesh* Awal Lokal, (b) Mengurangi Ukuran Elemen

Teknik *adaptive mesh* terakhir adalah merapikan yang meliputi merealokasikan node untuk memberikan bentuk elemen yang lebih baik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.9. Smoothing: (a) *mesh* lokal awal, (b) realokasi dari node

Prosedur adaptif *mesh* menurunkan kesalahan solusi dalam perhitungan oleh karena itu meningkatkan akurasi simulasi.

2.5.5 Model Benda Kerja Konstitutif

Salah satu tujuan yang paling penting dalam simulasi pemotongan logam adalah pemodelan tegangan alir benda kerja dengan baik untuk mendapatkan hasil yang benar. tegangan alir adalah tegangan luluh seketika dan itu tergantung pada regangan, laju regangan dan temperatur dan diwakili oleh bentuk matematika dari persamaan konstitutif. Antara lain, yang paling banyak digunakan dalam simulasi pemotongan logam adalah Oxley, Johnson-Cook dan Zerilli-Armstrong model konstitutif material.

2.5.5.1 Model Material Oxley

Oxley (1990) dan rekan-rekan kerjanya menggunakan hukum daya untuk mewakili aliran tegangan material untuk baja karbon sebagai

$$\sigma = \sigma_1 \varepsilon^n$$



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dimana σ dan ε adalah aliran stres dan regangan, σ_1 adalah stres aliran material di $\varepsilon = 1,0$ dan n adalah pengerasan eksponen strain. σ_1 dan n tergantung pada kecepatan temperatur dimodifikasi (T_{mod}) yang diberikan oleh Macgregor dan Fisher. T_{mod} didefinisikan sebagai

$$T_{\text{mod}} = T \left(1 - v \log \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)$$

Di mana v dan ε_0 adalah konstanta benda kerja dan memiliki nilai 0,09 dan 0,1 untuk baja karbon

2.5.5.2 Model Material Johnson and Cook

Johnson dan Cook (1993) mengembangkan model bahan berdasarkan torsi dan tes bar dinamis Hopkinson atas berbagai laju regangan dan temperatur. Persamaan konstitutif ini sebagai berikut:

$$\sigma = \left(A + B \varepsilon^n \right) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right)$$

Kurung pertama adalah bagian elastis-plastis dan itu menunjukkan pengerasan regangan. Kedua adalah istilah viskositas dan itu menunjukkan bahwa aliran stres bahan meningkat saat bahan terkena tingkat regangan tinggi. Yang terakhir adalah istilah temperatur pelunakan. A , B , C , n dan m adalah konstanta bahan yang ditemukan dengan tes material. T temperatur seketika, T_r adalah temperatur kamar dan T_m melting temperature bahan tertentu.

2.5.6 Model Gesekan

Pemodelan gesekan memainkan peran penting pada hasil seperti gaya potong, temperatur dan keausan alat dalam simulasi



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

pemotongan logam. Oleh karena itu, para peneliti berfokus pada menentukan model gesekan untuk mewakili perilaku nyata dari proses. yang paling banyak digunakan dalam pemotongan simulasi logam dapat terdaftar sebagai berikut.

2.5.6.1 Coulomb Konstan

Dalam simulasi pemotongan logam awal, model gesekan Coulomb sederhana digunakan pada zona kontak keseluruhan dengan koefisien gesekan terus menerus. Model ini didefinisikan sebagai :

$$\tau = \mu \sigma_n$$

Di sini, τ adalah tegangan gesekan, σ_n adalah tegangan normal dan μ adalah koefisien gesekan.

2.5.6.2 Shear Konstan

Dalam model gesekan geser, tegangan gesekan di ujung alat diasumsikan konstan dan variasi stres yang rendah dari τ dan σ_n diabaikan.

Hal ini dapat diformulasi sebagai berikut:

$$\tau = mk$$

Di mana m adalah faktor gesekan dan k adalah aliran geser stres dari bahan kerja.

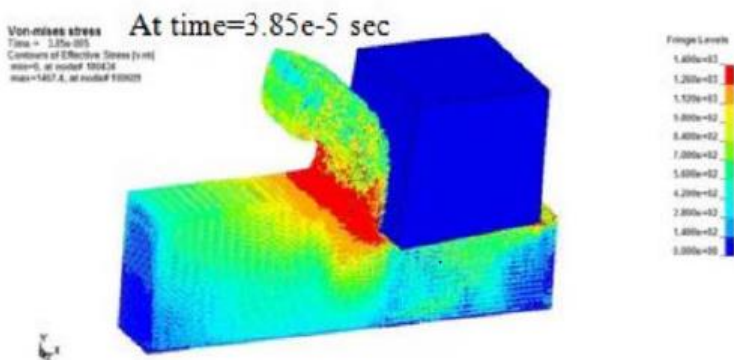
2.6 Software FE

Dalam beberapa tahun terakhir, komersial FE paket seperti Deform 2D / 3D, Abaqus, AdvantEdge, Ls-Dyna dan lain-lain telah digunakan secara masif di dunia baik akademik dan industri untuk analisis proses. Pilihan perangkat lunak FE untuk analisis pemotongan logam sangat penting untuk kualitas hasil. Hal ini karena paket FE yang berbeda memiliki kemampuan dan teknik pemecahan yang berbeda.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Ls-Dyna adalah program elemen hingga eksplisit dan implisit digunakan untuk menganalisis analisis keamanan dan kecelakaan, membentuk masalah. Ls-Dyna dapat digunakan untuk simulasi pemotongan logam seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9. Namun, program ini tidak termasuk modul mesin dan memakan waktu dalam model operasi pemotongan logam. Selain ini, Ls-Dyna tidak memiliki kemampuan untuk melakukan remeshing di alat dan bidang kontak benda kerja yang mempengaruhi hasil dalam simulasi pemotongan logam.



Gambar 2.10 Simulasi Pemotongan Logam dengan Ls-Dyna
(Sumber: Ambati 2008)

2.7 Model Pemotongan SPH

Metode SPH adalah teknik meshless Lagrangian. sifat material dan variabel state diperkirakan dengan nilai-nilai mereka pada set poin diskrit, atau partikel SPH. Hal ini untuk menghindari masalah ketidakberaturan dan distorsi mesh yang biasanya terjadi di analisis Lagrangian yang melibatkan deformasi besar.

Gambaran dari kekhususan utama dari pemotongan model SPH, pendekatan dibandingkan dengan model Lagrangian FE klasik pada Tabel 2.2.



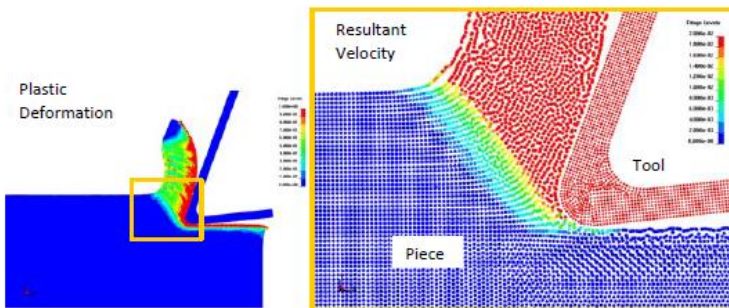
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

	<i>Lagrangian FE models</i>	<i>SPH cutting model</i>
<i>Large deformation process</i>	Adaptative remeshing algorithm	SPH meshless nature
<i>New free surfaces creation</i>	Continuous remeshing and fracture model	Particles separation
<i>Contact</i>	Friction Coulomb approach	Particles interactions

Metode SPH untuk pemodelan memiliki beberapa keunggulan.

Pertama, regangan tinggi dengan mudah ditangani. Partikel bergerak relatif satu sama lain dalam cara teratur selama deformasi. Hal ini dapat dianggap sebagai partikel menyusun ulang tanpa pembatasan topologi, dengan demikian *remeshing* tidak diperlukan.

Keuntungan lain yang disebabkan oleh SPH adalah pemisahan Chip / benda kerja 'alami'. Gerak relatif dari partikel menciptakan pembukaan. Permukaan bebas baru yang diberikan oleh posisi partikel. Dengan demikian, benda kerja “mengalir secara alami” disekitar ujung alat (Gambar 2.10).



Gambar 2.11 Pemisahan *Chip* (sumber: Limido, 2011)

2.8 Analisa Gaya

Karya Dr. Merchant pada tahun 1944 menyajikan model 2-D yang disederhanakan dari proses pemesian miring konvensional yang disebut proses permesinan ortogonal yang

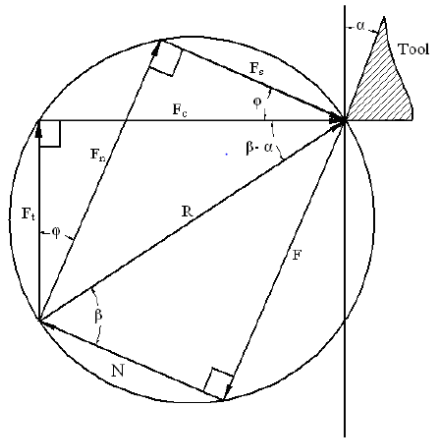


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

hanya mempertimbangkan dua sumbu pada satu waktu yang juga merupakan salah satu model penelitian yang banyak digunakan karena melibatkan perhitungan yang lebih rumit, lebih mudah untuk dianalisis dan terlebih lagi ditemukan berada dalam kesepakatan yang baik ketika diperluas ke model 3-D. Model permesinan ortogonal Merchant terdiri dari dua tipe 1) pelat ortogonal yang berputar pada kecepatan sedang dan tinggi (OPT), 2) tabung ortogonal berputar pada kecepatan sedang (OTT) dan umumnya ditandai dengan berikut:

- Ujung pahat tajam dan tidak ada kontak dengan benda kerja di permukaan sudut *clearance*.
- Bidang ujung pahat tegak lurus terhadap arah gerak.
- Alat bergerak dengan kecepatan konstan dan ketebalan *chip* yang belum dipotong menghasilkan chip.
- Ujung pahat pada alat ini lebih lebar dari pada ketebalan benda kerja

Kerja menggambarkan model geometris dari sistem gaya yang biasa disebut sebagai diagram merchant/lingkaran merchant ditunjukkan pada gambar . F_c adalah gaya pemotong yang bekerja sepanjang sumbu horizontal pada ujung alat dan permukaan benda kerja karena gerak benda kerja terhadap alat yang juga disertai dengan gaya dorong F_t beraksi pada sumbu vertikal tegak lurus terhadap F_c pada contoh yang sama.



Gambar 2.12 Diagram Gaya Merchant

Dimana :

N = Gaya friksi normal

Fε = Gaya Geser

F = Gaya friksi

α = Sudut serpih

$$\beta = \text{Sudut friksi}$$
$$\phi = \text{Sudut geser}$$

Fc = Gaya potong

F_n = Gaya geser normal

R = Gaya resultan



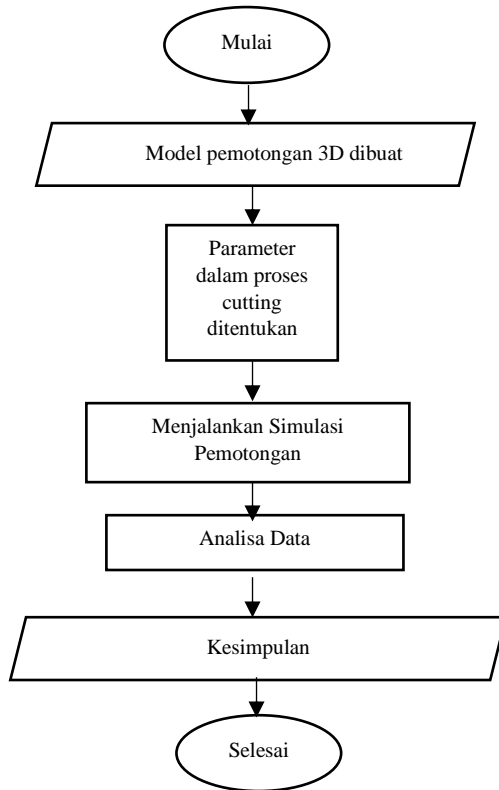
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

Diagram Alir pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian



BAB III METODOLOGI

Tabel 3.1 Tabel Input dan Output Penelitian

Input	Output
AISI T15 <i>High Speed Steel</i>	
AISI 1018 <i>Mild Carbon Steel</i>	Aliran Tegangan (<i>Flow Stress</i>)
	Gaya Potong (Fc)

3.2. Spesifikasi Material dan Parameter *Cutting Process*

3.2.1. Material Penelitian

Tabel 3.2 Standar Komposisi Kimia AISI T15 *High Speed Steel* (UNS T12015)

Unsur	C	Co	V	Cr	W	Mo	Ni	Cu	Mn	Fe
Min	1.50	4.75	4.50	3.75	11.75	-	-	-	0.15	Balance
Max	1.60	5.25	5.25	5.00	13.0	1	0.3	0.25	0.40	

Tabel 3.3 Standar Komposisi Kimia AISI 1018 *Mild Carbon Steel* (UNS G10180)

Unsur	C	Mn	S	P	Fe			
Min	0.14	0.60	-	-	Balance			
Max	0.20	0.90	0.05	0.04				



Tabel 3.4 Properti dari AISI T15 *High Speed Steel*

No	Properti	Metrik
1	Massa jenis	8.19 g/cc
2	Modulus elastisitas	207 GPa
3	<i>Poisson ratio</i>	0.3
4	Konduktivitas Termal	20.9 W/m-K

Tabel 3.5 AISI 1018 *Mild Carbon Steel*

No	Properti	Metrik
1	Massa jenis	7.87 g/cc
2	Modulus <i>shear</i>	80 GPa
3	Modulus elastisitas	205 GPa
4	<i>Poisson ratio</i>	0.29
5	<i>Melting temperature</i>	1420 °C
6	Konduktivitas termal	51.9 W/m-K
7	Kapasitas panas	470 J/kg-K

3.2.2. Geometri Penelitian

Geometri yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari geometri dari benda potong dan geometri dari perkakas potong dengan sudut potong yang berbeda.

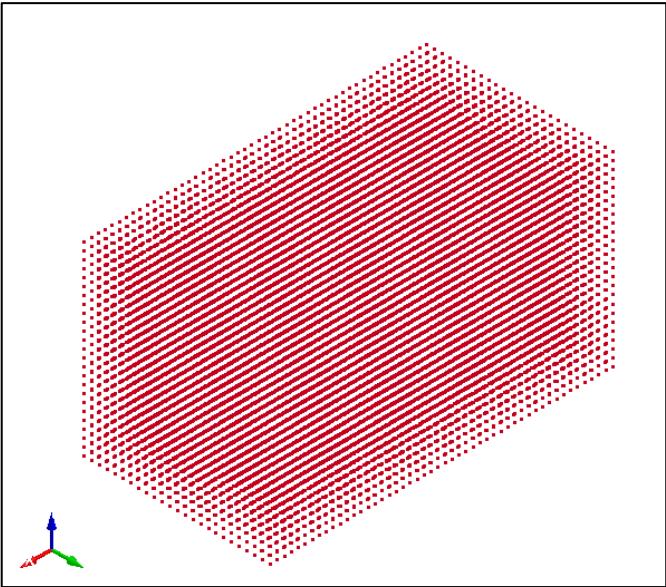
3.2.2.1. Geometri Perkakas Potong dan Benda Potong

Geometri perkakas potong yang digunakan merupakan ujung pahat yang memiliki sudut lancip, perkakas potong ini digunakan untuk memotong benda potong yang berbentuk balok.



Tabel 3.6. Dimensi Utama Perkakas dan Benda Kerja

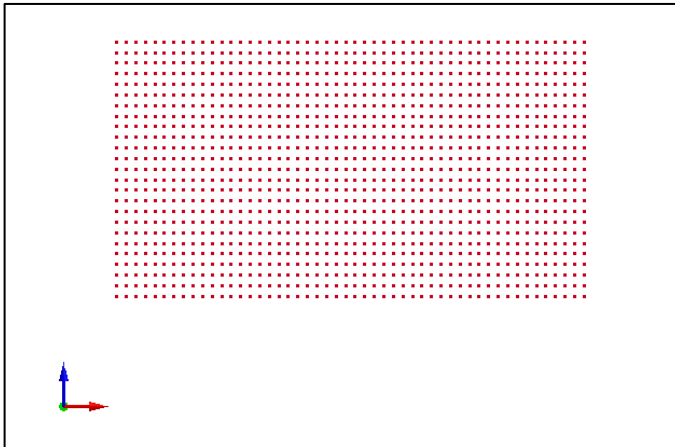
	Alat Potong	Benda Kerja
Bahan	AISI T15 <i>High Speed Steel</i>	AISI 1018 <i>Mild Carbon Steel</i>
Dimensi	Panjang - 20 mm Tinggi - 8 mm	5mm*7 mm*5 mm (termasuk sudut rake dan clearance dari perkakas) <i>tool tip : 0.2</i>



Gambar 3.2. Tampak Penuh dari Benda Kerja AISI 1018 *Mild Carbon Steel*

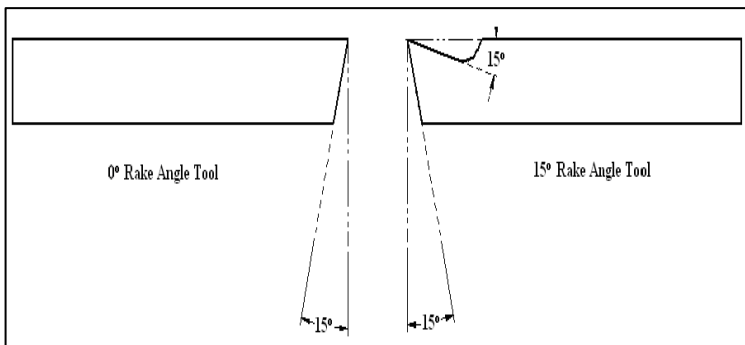


BAB III METODOLOGI

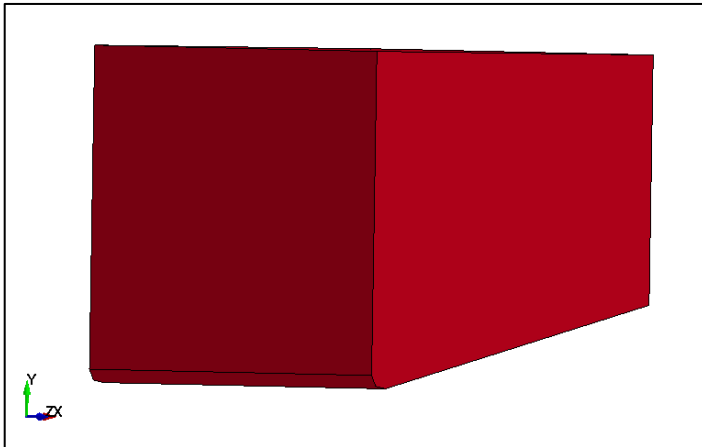


Gambar 3.3. Tampak Samping dari Benda Kerja AISI 1018 *Mild Carbon Steel*

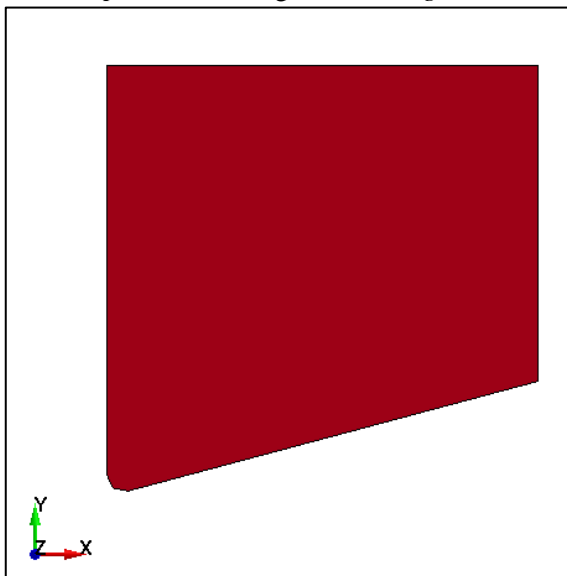
Perkakas yang digunakan di penelitian ini menggunakan dua sudut *rake* yang berbeda yaitu 0° , -15° , dan 15° .



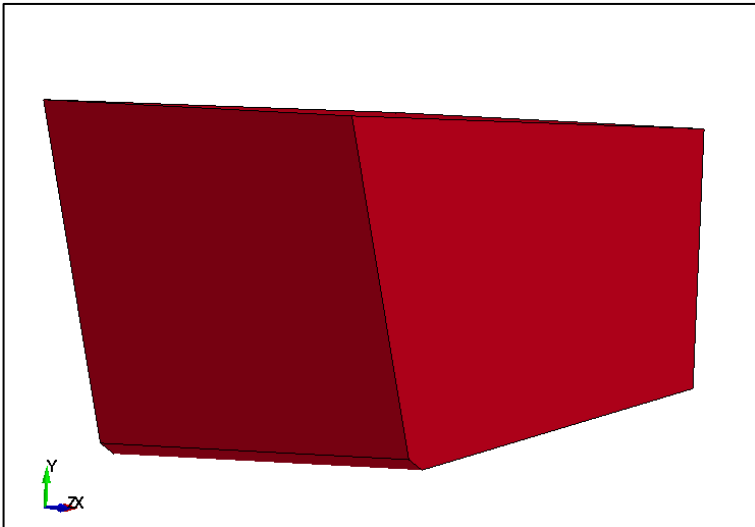
Gambar 3.4. Perkakas dengan Sudut Potong Berbeda



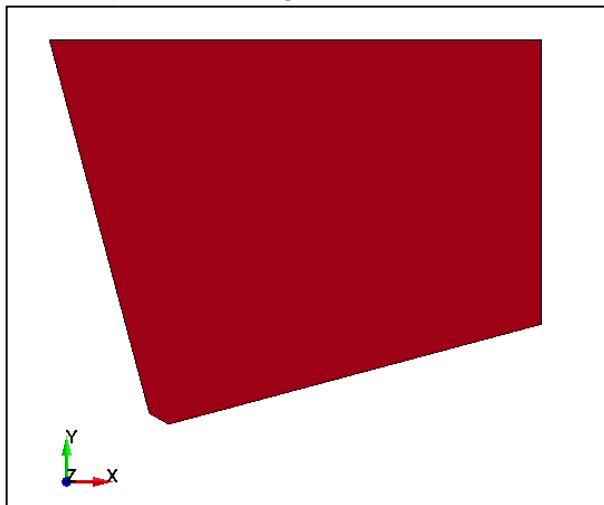
Gambar 3.5. Tampak Penuh Perkakas Potong AISI T15 *High Speed Steel* dengan *Rake Angle* 0°



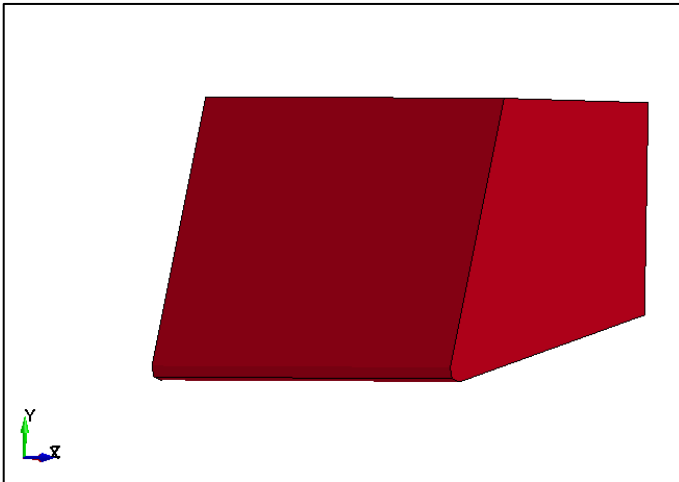
Gambar 3.6. Tampak Samping Perkakas Potong AISI T15 *High Speed Steel* dengan *Rake Angle* 0°



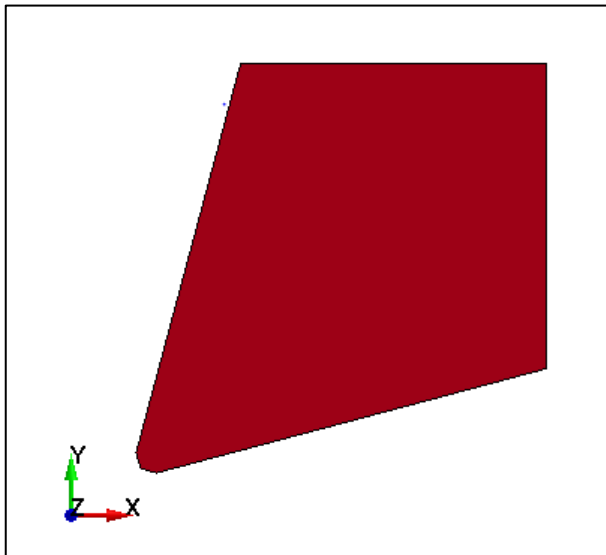
Gambar 3.7. Tampak Penuh Perkakas Potong AISI T15 *High Speed Steel* dengan *Rake Angle* -15°



Gambar 3.8. Tampak Samping Perkakas Potong AISI T15 *High Speed Steel* dengan *Rake Angle* -15°



Gambar 3.9. Tampak Penuh Perkakas Potong AISI T15 *High Speed Steel* dengan *Rake Angle* 15°

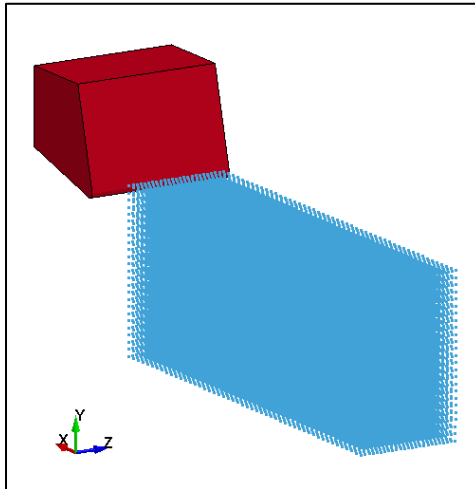


Gambar 3.10. Tampak Samping Perkakas Potong AISI T15 *High Speed Steel* dengan *Rake Angle* 15°

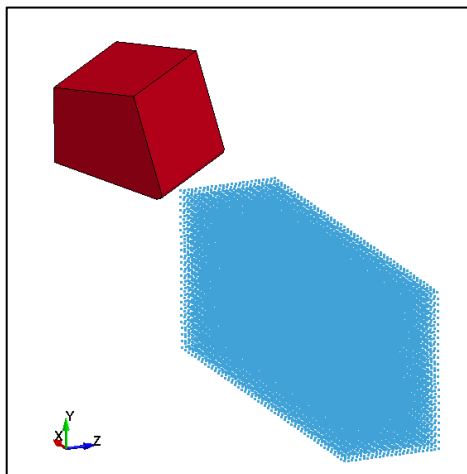


BAB III METODOLOGI

Dalam penelitian ini dilakukan dua tipe pemotongan yaitu *orthogonal* dan *oblique*



Gambar 3.11. *Orthogonal Cutting*



Gambar 3.12. *Oblique Cutting*



BAB III METODOLOGI

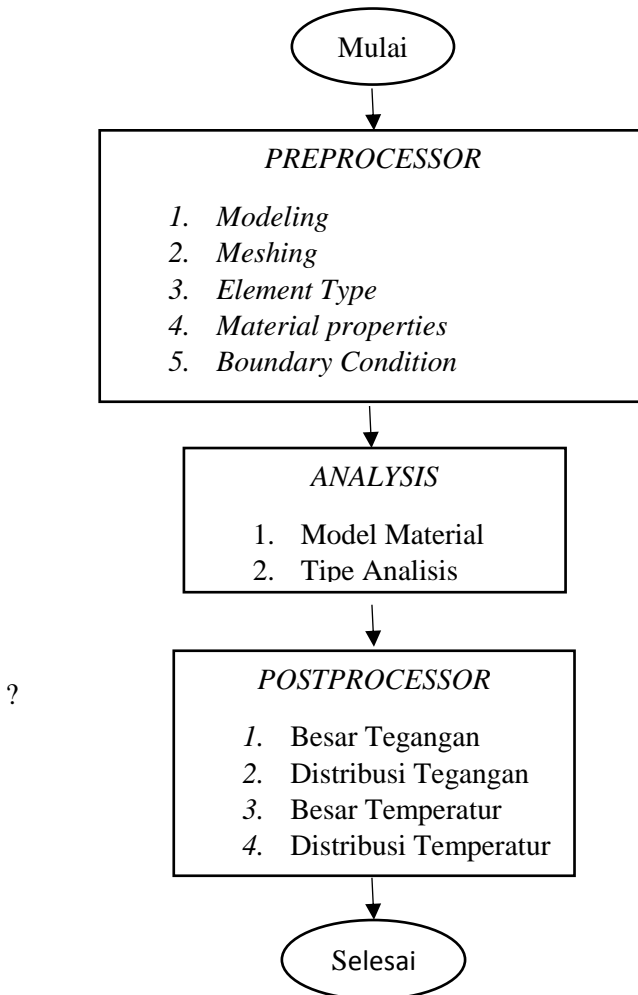
3.3. Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut

1. LS-PrePost(R) V4.3 yang digunakan sebagai alat untuk memodelkan simulasi proses pemotongan dengan metode *SPH*.
2. ANSYS 17.0 Mechanical *APDL* merupakan *software* yang digunakan sebagai alat untuk menjalankan proses *running* dari model yang telah dibuat di LS-PrePost.

3.4. Prosedur Penelitian

Prosedur yang digunakan pada tugas akhir ini adalah permodelan dengan menggunakan *software* LS-PrePost yang tercantum pada Gambar 3.13. sebahai berikut :



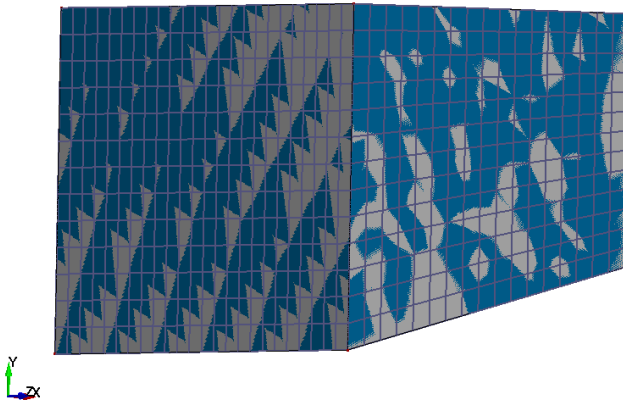
Gambar 3.13. Diagram Alir Permodelan



BAB III METODOLOGI

3.4.1. *Meshing*

Dalam melakukan pemodelan simulasi proses pemotongan metal, langkah pertama yang dilakukan adalah melakukan meshing terhadap material perkakas potong dan benda kerja,



Gambar 3.14. *Meshing*

Perkakas potong *dimeshing* menggunakan *solid mesher* terdapat dalam pilihan *element and mesh* di *keyword manager* dengan ukuran elemen 0.3 dan jumlah *nodes* berkisar 6734 *nodes*. Untuk benda kerja digunakan *SPH Generation* di dalam *element and mesh* untuk benda kerja memiliki jumlah nodes 31250 *nodes*.

3.4.2. **Penentuan Tipe Elemen**

Tipe elemen didefinisikan dari opsi *mat* dalam *keyword manager* dibawah tab *model and part*. Model untuk simulasi ini dibuat dengan menggunakan dua material berbeda yaitu benda kerja dan perkakas potong. Perkakas potong dimodelkan *rigid* dan model material didefinisikan sebagai *johnson-cook*. Model ini



BAB III METODOLOGI

memprediksi aliran tegangan atas berbagai laju regangan dan suhu berdasarkan persamaan dibawah:

$$\sigma = \left(A + B \varepsilon^n \right) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right)$$

Untuk perkakas potong pada tab *section* dipilih tipe elemen *solid* sedangkan untuk benda kerja dipilih tipe elemen *smooth particle hydrodynamics*.

3.4.3. Penentuan Sifat Material

Sifat material dari benda kerja dan alat potong dalam penelitian ini ditentukan dalam LS Dyna menggunakan material model opsi dibawah *keyword manager* dalam tab *model and part*. Kriteria pembentukan chip adalah berdasarkan nilai regangan plastis efektif dimana ketika benda kerja mencapai nilai *threshold*, dihapus, kemudian menyebabkan terpisahnya material menjadi *chip*.

Keyword Input Form

Buttons: NewID, Draw, MatDB, RefBy, Pick, Add, Accept, Delete, Default, Done

Subsys: 1 New_Subsystem_1

Setting

*MAT_JOHNSON_COOK_(TITLE) (1)

TITLE: workpiece

1	MID	RO	G	E	PR	DTE	VP	RATEOP
1		7.870e-006	80.000000	205.00000	0.2900000	1.800e-007	0.0	0.0

2	A	B	N	C	M	TM	TR	EPSO
	0.5530000	0.6010000	0.2340000	0.0134000	1.0000000	1480.0000	20.000000	0.0010000

3	CP	PC	SPALL	IT	D1	D2	D3	D4
	470.00000	0.0	2.0	0.0	1.2000000	0.0	0.0	0.0

4	DS	C2/P	EROD	EFMIN
	0.0	0.0	0	1.000e-006

Total Card: 1 Smallest ID: 1 Largest ID: 1 Total deleted card: 0

Gambar. 3.15. Penentuan Material Properties dari Benda Kerja



BAB III METODOLOGI

The screenshot shows the 'Keyword Input Form' for defining material properties. The title is '*MAT_RIGID_(TITLE) (1)'. The form includes a table for material properties with columns: MID, SQ, E, PR, N, COUPLE, M, and ALIAS. The first row (MID=2) contains values: 8.190e-006, 207.00000, 0.3000000, 0.0, 0, 0.0, and an empty ALIAS field. The second row (MID=2) contains values: 1.0, 5, 7, and empty fields for COUPLE, M, and ALIAS. The third row (MID=2) contains values: 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, and 0.0. The form also has a 'COMMENT:' section and a status bar at the bottom indicating 'Total Card: 1, Smallest ID: 2, Largest ID: 2, Total deleted card: 0'.

Gambar. 3.16. Penentuan Material Properties dari Perkakas Potong

The screenshot shows the 'Keyword Input Form' for defining thermophysical properties. The title is '*MAT_THERMAL_ISOTROPIC_(TITLE) (2)'. The form includes a table for material properties with columns: TMID, TRQ, TGRUC, TGMULT, TLAT, and HLAT. The first row (TMID=2) contains values: 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, and 0.0. The second row (TMID=2) contains values: 470.00000, 5.190e-005, and empty fields for TGRUC, TGMULT, TLAT, and HLAT. The form also has a 'COMMENT:' section and a status bar at the bottom indicating 'Total Card: 2, Smallest ID: 1, Largest ID: 2, Total deleted card: 0'.

Gambar. 3.17. Thermophysical Properties dari Benda Kerja

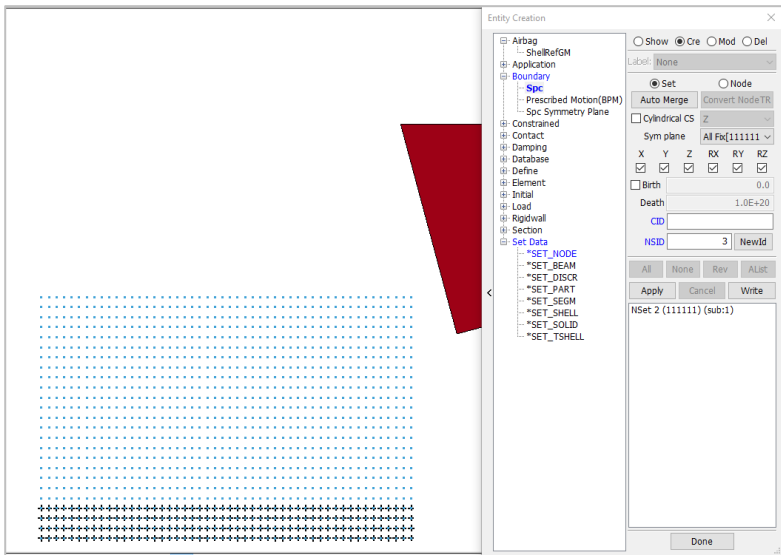
3.4.4. Boundary Condition

Sebelum berlanjut lebih jauh ke *boundary conditions* dan parameter lainnya penting untuk mendefinisikan *node set* yang memudahkan saat kontak permukaan benda kerja. Hal ini dapat dilakukan dengan memilih tab *model and part* kemudian pilih



BAB III METODOLOGI

create entity yang mana kemudian *set data* dipilih lalu *set nodes* digunakan untuk mendefinisikan *nodes* yang diambil dari geometri benda kerja.



Gambar. 3.18. Pembuatan *Set Nodes*

Pada model simulasi, benda kerja di tetapkan pada titik tertentu dan perkakas bergerak ke arah benda kerja dengan kecepatan konstan. Karena benda kerja tidak bergerak, semua *degree of freedom* ditiadakan termasuk translasi dan rotasi. *Degree of freedom* dari perkakas juga sepenuhnya ditiadakan untuk semua arah kecuali arah ke sumbu x. *Boundary conditions* dibuat dengan memilih *model and part* kemudian keyword manager dimana tab *boundary* dipilih. *Prescribed_motion_rigid* dipilih untuk benda kerja dimana semua DOF dibatasi dengan memilih nilai 1.



BAB III METODOLOGI

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter (Subsys: 1 New_Subsystem_1) Setting

*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID,(ID) (1)

ID	TITLE
1	PID DOF VAD LCID SE VID DEATH BURTH
1	1 0 1 1.0000000 0 1.000e+028 0.0

COMMENT:

Total Card: 1 Smallest ID: 1 Largest ID: 1 Total deleted card: 0

Gambar. 3.19. Menentukan *Boundary Conditions*

3.4.5. Model Kontak dan Gesekan

Suatu tipe kontak *auto nodes to surfaces* digunakan untuk mendefinisikan kontak antara perkakas dan benda kerja.

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter (Subsys: 1 New_Subsystem_1) Setting

*CONTACT_AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE,(ID/TITLE/MPP) (1)

☐ MPP1 ☐ MPP2

2	IGNORE	BUCKET	LCBUCKET	NS2TRACK	INITITER	PARMAX	UNUSED	CPARM2
0	200			3	2	1.0005		0
3	UNUSED	CHKSEGS	PERSE	GRPPABLE				
0			1.0	0				
4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
1	1	4	3	0	0	0	0	0
5	ES	ED	DC	VC	VDC	PENCHK	RT	DT
0.2000000	0.2000000	0.0	0.0	20.000000	0	0.0	1.000e+020	
6	SFS	SFM	SST	MST	SFST	SFMT	FSF	VSF
1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000
<input checked="" type="checkbox"/> Thermal <input type="checkbox"/> T_Friction <input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> AB <input type="checkbox"/> ABC <input type="checkbox"/> ABCD <input type="checkbox"/> ABCDE <input type="checkbox"/> ABCDEF								
7	CF	FRAD	HTC	LMIN	LMAX	FTOSLV	BC_FLG	ALGO
0.0	0.0	5.190e-005	2.0000000	1.000e+004	1.0000000	0	0	
8	LCFST	LCFDT	FORMULA	a	b	c	d	LCH

Total Card: 1 Smallest ID: 1 Largest ID: 1 Total deleted card: 0

Gambar 3.20. Definisi Tipe Kontak



Definisi kontak di LS Dyna dengan memilih *model and part* dimana *keyword manager* dipilih dari *automatic_node_to_surface* dari opsi *contact*. *Master object* dari perkakas yang diketahui sebagai part id dan slave object dari benda kerja ditampilkan sebagai *node set*. Nilai dari FS dan FD ditetapkan sama sehingga software dapat mengintrepetasikan hanya gesekan konstan yang ada.

3.4.6. Kontrol

Kontrol dapat diakses dari *Keyword Manager* dibawah *model and part*. Berbagai tipe kontrol dibutuhkan untuk melakukan *running* dengan sukses. Beberapa yang dibutuhkan untuk masalah ini dapat didefinisikan dalam opsi *control* seperti berikut:

1. *Energy control*, semua nilai diset ke 2.
2. *Solution control*, semua nilai *default* kecuali SOLN diset ke 2 untuk analisa thermal dan struktural.
3. *Termination control*, semua nilai diset *default* kecuali ENDTIM diset 3 dimana program akan otomatis berhenti.
4. *Timestep control*, nilai TSSFAC diganti menjadi 0.6 direkomendasikan untuk metode SPH
5. *Thermal nonlinear control*, nilai REFMAX diganti menjadi 100
6. *Thermal solver*, nilai ATYPE diganti 1 dimana analisis termal adalah *transient analysis* kemudian PTYPE diset 2, CGTOL 1.0E-06 dan GPT diset 1.
7. *Thermal Timestep*, nilai ITS diset 1e-3, TMIN 1e-7, TMAX 1.39e-2, dan DTEMP 100.

3.4.7. Tipe Analisis

Tipe analisis dalam tugas akhir ini adalah analisis termal dan struktural.



BAB III METODOLOGI

3.5. Langkah Penelitian

Penelitian tugas akhir ini terdiri dari beberapa tahapan penelitian sebagai berikut:

1. Pengumpulan data dan studi literatur
Pada tahap ini, data-data penting seperti desain perkakas potong, desain benda potong, sifat material AISI T15 *High Speed Steel* dan AISI 1018 *Mild Carbon Steel* +diperoleh dari sumber jurnal.
2. Pembuatan geometri
Geometri perkakas potong dan benda potong dibuat menggunakan LS Pre-Post.
3. Menjalankan simulasi
Simulasi pemotongan dilakukan pada *software* ANSYS *Mechanical* APDL sesuai desain yang ada dan batasan masalah yang digunakan.
4. Analisa Data
Membandingkan efek dari berbagai parameter pemotongan seperti sudut rake, kedalaman potong, dan tipe pemotongan.
5. Kesimpulan
Pada akhir penelitian dilakukan penarikan kesimpulan sesuai dengan tujuan penelitian

3.6. Variabel Penelitian

Variabel dalam penelitian ini ada dua jenis, yaitu variable terikat dan variabel bebas.

1. Variabel terikat berupa : Sifat material berupa densitas, *poison ratio*, sifat elastisitas, koefisien gaya gesek, desain benda potong, dan tipe pemotongan.
2. Variabel bebas berupa : Desain perkakas potong, tool tip radius, dan kedalaman potong

BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Metode smooth particle hydrodynamics digunakan simulasi proses pemotongan logam. Pada penelitian ini analisa tegangan hasil proses pemotongan akan dibandingkan antara sudut serpih yaitu 0° , 15° , dan -15° yang memiliki kedalaman potong 1mm dan jenis pemotongan *orthogonal*. Kemudian untuk analisa tegangan yang kedua adalah membandingkan pengaruh kedalaman potong terhadap besar tegangan dimana kedalaman potong yang digunakan adalah 1 dan 1.5 mm. Pada penelitian ini juga membandingkan dua tipe pemotongan yaitu pemotongan *orthogonal* dan *oblique* dengan variasi sudut serpih sama seperti sebelumnya. Selain analisa tegangan pada penelitian ini juga dilakukan analisa temperatur dimana variasi-variasi pemotongan masih menggunakan variasi yang sama dengan analisa tegangan. Analisa temperatur sendiri dibagi menjadi tiga bagian yaitu temperatur saat awal perkakas memotong benda kerja, saat pertengahan dan saat perkakas berada diujung benda kerja atau saat proses pemotongan hampir selesai. Kemudian analisa perbandingan radius tool tip terhadap tegangan juga disertakan. Berikut ini adalah tabel lengkap mengenai perbandingan simulasi pemotongan dengan variasi sudut serpih, kedalaman potong, dan tipe pemotongan.

Tabel 4.1. Variasi Proses Pemotongan Logam

N o	Sudut serpih	Kedalaman Potong (mm)	Tipe pemotongan
1	0	1	<i>orthogonal</i>
2	15	1	<i>orthogonal</i>
3	-15	1	<i>orthogonal</i>
4	15	1.5	<i>orthogonal</i>
5	15	1	<i>oblique</i>

Model simulasi memasuki tahap akhir yang menggunakan LS Prepost. *Output* dari proses *running* ini adalah dalam bentuk



BAB IV ANALISIS DATA

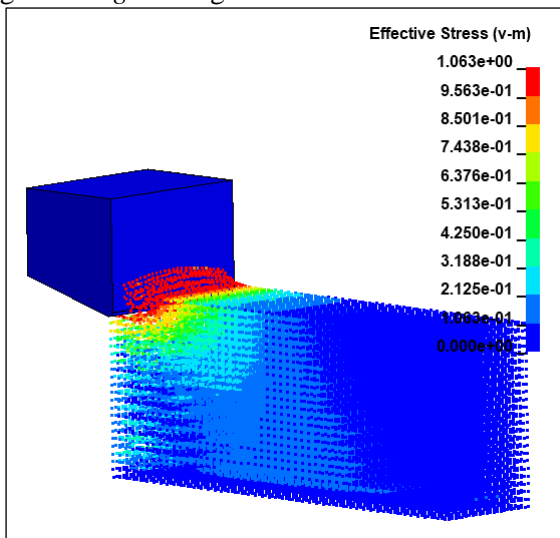
binary plot dan ini diimport ke *post processor* menggunakan opsi "File-open-ls dyna binary plot". Hasil simulasi dianimasikan menggunakan pada tombol *play* yang ada di bagian bawah. Untuk mendapatkan hasil dari berbagai parameter yang diinginkan tab POST dipilih, dan mengaktifkan opsi *Fringe Component*. Dari menu ini dapat diperoleh tegangan geser, regangan plastis dapat diplot dan dianimasikan.

Gaya disimpan pada folder yang berbeda yaitu *rcforc*. Data file kurva disimpan pada bentuk .txt sehingga bisa digunakan untuk analisa lebih lanjut menggunakan excel.

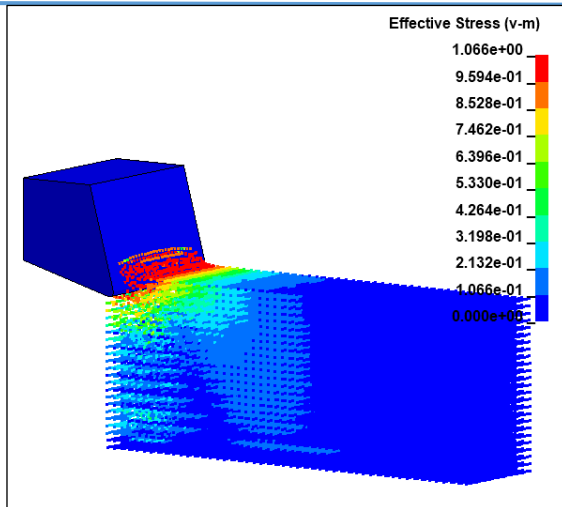
4.1 Analisa Mekanis Sudut Serpih

4.1.1. Sudut Serpih 0° , 15° , dan -15° Kedalaman Potong 1 mm

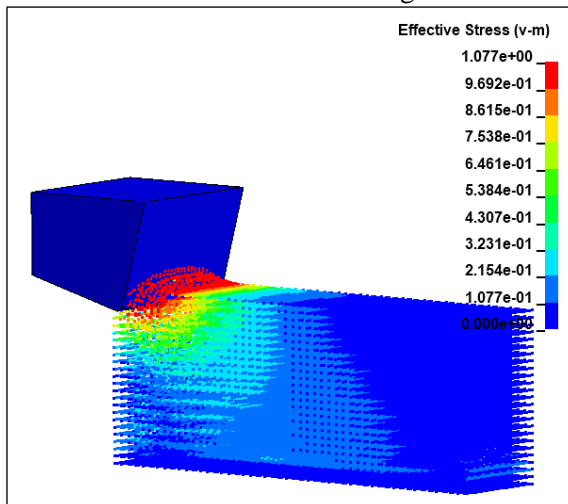
Pada bagian ini pengaruh perbedaan sudut serpih pada benda kerja diteliti. Pertama variasi pemotongan dengan sudut serpih 0° dan 15° dan -15° kedalaman potong 1mm, dan tipe pemotongan *orthogonal* digunakan.



Gambar 4.1 Persebaran Tegangan Geser Sudut Serpih 0° Pada Awal Proses Pemotongan



Gambar 4.2 Persebaran Tegangan Geser Sudut Serpilh 15° Pada Awal Proses Pemotongan



Gambar 4.3 Persebaran Tegangan Geser Sudut Serpilh -15° Pada Awal Proses Pemotongan

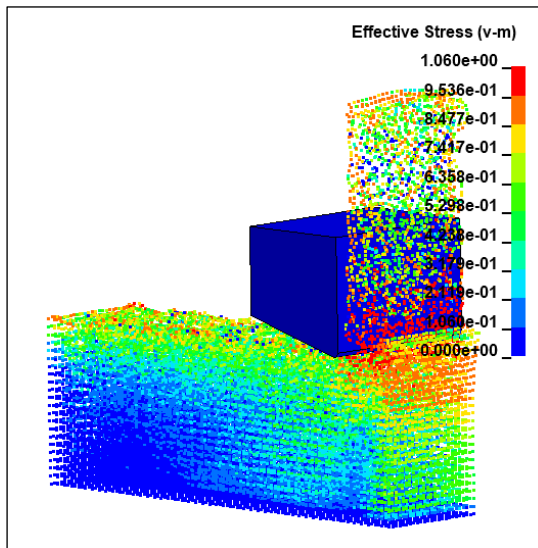


BAB IV ANALISIS DATA

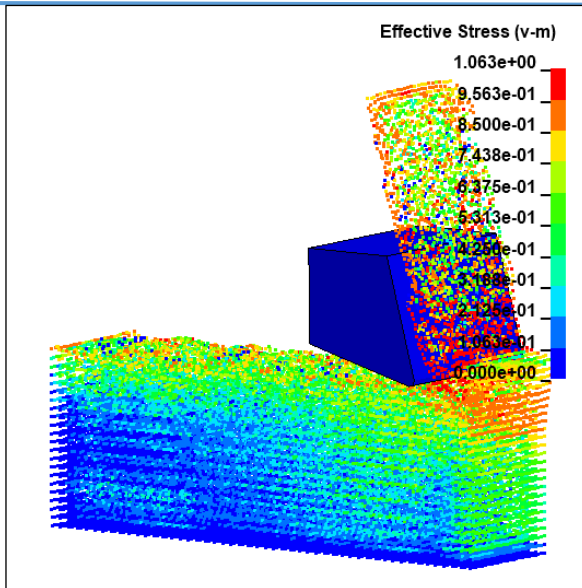
Pada gambar 4.1. terlihat bahwa bagian ujung perkakas potong menyentuh benda kerja pada daerah ini (memiliki nilai tegangan maksimum sebesar 1.063 GPa. Sedangkan gambar 4.2 menunjukkan besar tegangan pada serpih 15° yang memiliki nilai maksimum 1.066 GPa. Pada gambar 4.3 sudut serpih tegangan maksimum meningkat menjadi 1.077 GPa karena kontak antara perkakas dan material benda kerja terjadi di area yang lebih luas pada *secondary shear zone*.

Tabel 4.2 Tegangan Maksimum Pada Awal Pemotongan

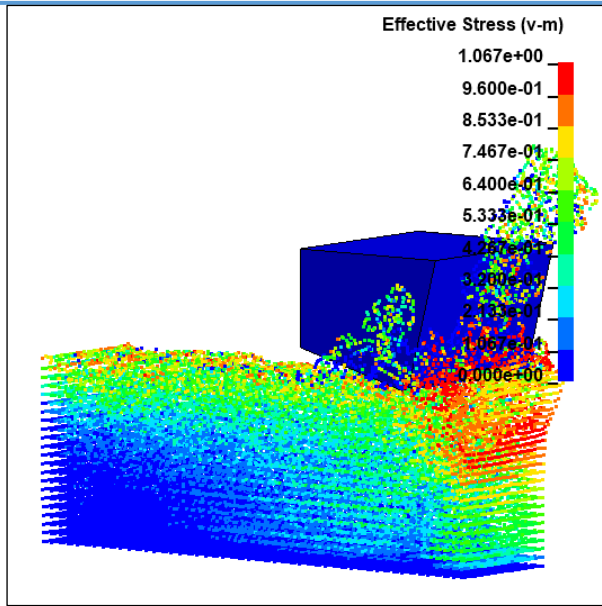
Sudut Serpih	Tegangan Maksimum (GPa)
0°	1.063
15 °	1.066
-15°	1.077



Gambar 4.4. Persebaran Tegangan Geser Sudut Serpih 0° Pada Akhir Proses Pemotongan



Gambar 4.5. Persebaran Tegangan Geser Sudut Serpih 15° Pada Akhir Proses Pemotongan



Gambar 4.6. Persebaran Tegangan Geser Sudut Serpilh -15° Pada Akhir Proses Pemotongan

Pada gambar 4.4. Pada akhir proses pemotongan nilai tegangan maksimum pada tahap ini adalah 1.060 GPa. Selama proses berlangsung nilai tegangan maksimum dengan range antara 1.064 sampai 1.092, nilai tertinggi tegangan terjadi pada *timestep* ke 0.70. Dari simulasi juga dapat dilihat bentuk *chip* yang *continue*.

Untuk sudut 15° tegangan maksimum pada akhir pemotongan adalah 1.066 GPa. Sedangkan range tegangan maksimum selama proses pemotongan adalah antara 1.064 sampai 1.084. Jadi sudut serpih 0° memiliki nilai tegangan maksimum yang lebih tinggi dibandingkan sudut serpih 15° .

Pada akhir pemotongan sudut -15° nilai tegangan maksimum adalah 1.067 GPa. Pada bentuk chip terjadi pemisahan chip karena nilai tegangan yang besar pada *secondary shear zone*.



BAB IV ANALISIS DATA

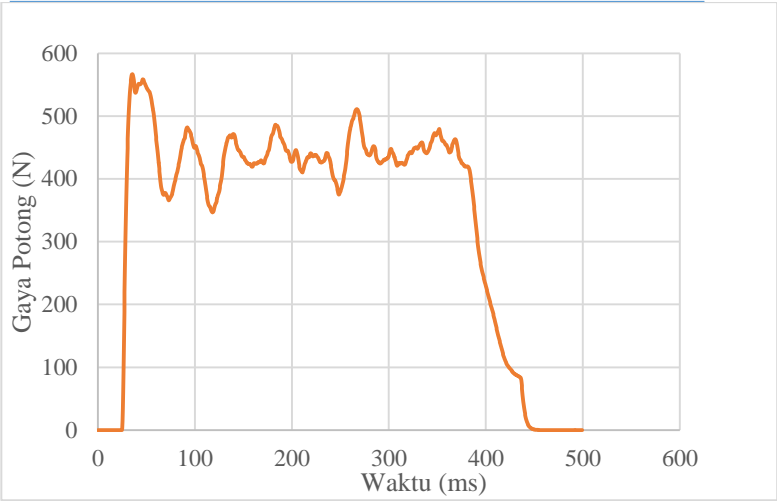
Pada permukaan benda kerja juga terlihat belum rata . Range tegangan pada keseluruhan proses ini adalah 1.065-1.084 GPa. Pada penelitiannya Hamed (2017) juga memperlihatkan pengaruh dari sudut serpih terhadap tegangan maksimum pada benda kerja dimana sudut serpih negatif memiliki nilai tegangan maksimum tertinggi, kemudian diikuti sudut serpih positif, dan terakhir sudut serpih 0° .

Tabel 4.3 Tegangan Maksimum Pada Akhir Pemotongan

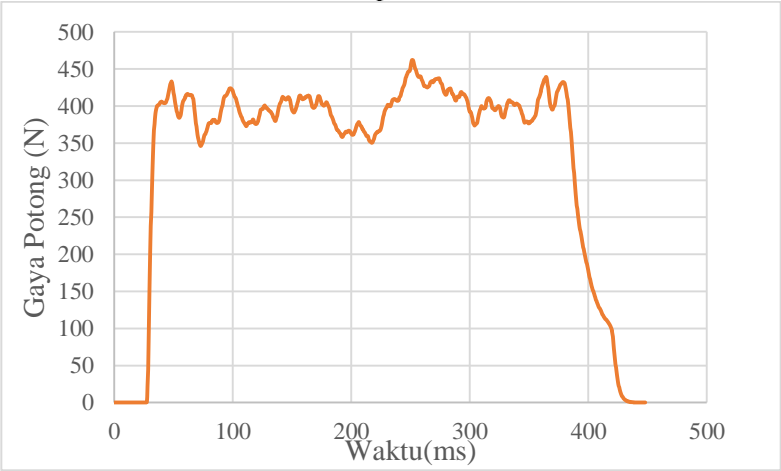
Sudut Serpih	Tegangan Maksimum (GPa)
0°	1.063
15°	1.060
-15°	1.067

Dari gambar 4.4 sampai 4.6 dapat dilihat bahwa semakin negatif sudut serpih perkakas potong maka akan meningkatkan kekasaran permukaan dari benda kerja hasil proses pemotongan. Hal ini juga dijelaskan Kuttolamadam (2010) pada jurnalnya bahwa peningkatan sudut serpih juga meningkatkan kekasaran permukaan hasil dari proses pemotongan.

BAB IV ANALISIS DATA

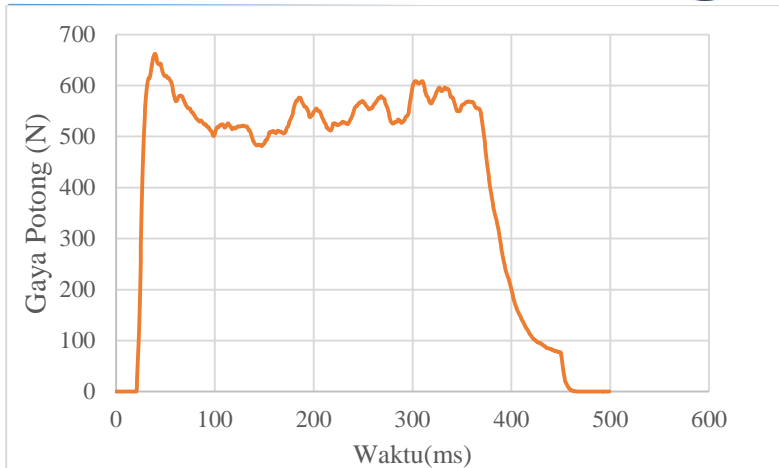


Gambar 4.7. Perbandingan Gaya Potong Terhadap Waktu Sudut Serpih 0°



Gambar 4.8. Perbandingan Gaya Potong Terhadap Waktu Sudut Serpih 15°

BAB IV ANALISIS DATA



Gambar 4.9. Perbandingan Gaya Potong Terhadap Waktu Sudut Serpih -15°

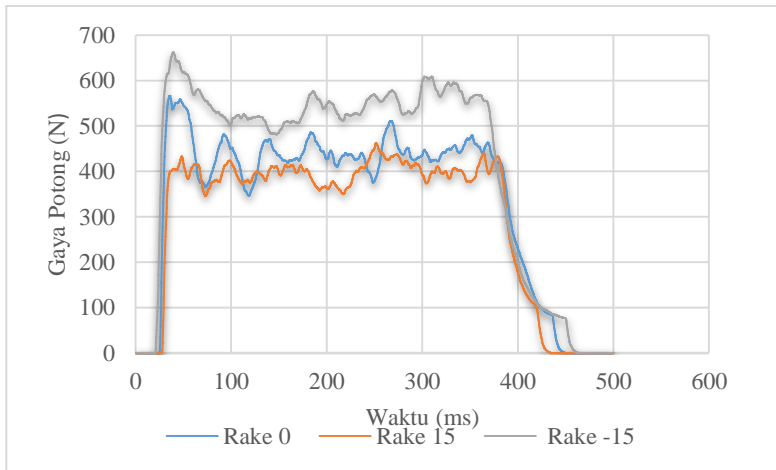
Gambar 4.7 memperlihatkan perbandingan gaya potong terhadap waktu dimana terjadi peningkatan gaya yang tinggi saat perkakas mulai memotong benda kerja dimana nilai maksimum gaya potong adalah 608.59 N. Seiring berjalannya waktu gaya potong mengalami kenaikan dan penurunan dan menurun drastis pada saat berakhirnya proses pemotongan. Rata-rata nilai potong untuk proses ini adalah 395.61 N. Sedangkan pada gambar 4.8 nilai maksimum gaya potong adalah 489.66 N dan rata-rata nilai gaya potong sebesar 357.93 N. Pada sudut serpih -15° memiliki nilai maksimum gaya potong sebesar 679.24 N dan rata-rata gaya potong adalah 464.98 N. Dari data tersebut dapat dilihat bahwa dari sudut *serpih* positif ke negatif maka gaya potong akan semakin besar. Vardhan (2011) pada penelitiannya melaporkan ketika sudut serpih berubah dari negatif menjadi positif maka gaya potong akan semakin berkurang dimana penelitian ini dilakukan dengan membandingkan hasil proses simulasi dan eksperimen.



BAB IV ANALISIS DATA

Tabel 4.4 Gaya Potong Pada Tiga Sudut Serpih

Sudut <i>Serpih</i>	Gaya Potong (N)
0°	395.61
15°	357.93
-15°	464.98



Gambar 4.10. Perbandingan Gaya Potong Terhadap Waktu dengan Tiga Sudut Serpih Berbeda

Dari persamaan gaya potong pada pemotongan *orthogonal* $F_c = \frac{F_t}{\tan(\beta - \alpha)}$, F_t adalah *thrust force*, F_c adalah *cutting force* β adalah *friction angle* dan α adalah *sudut serpih* bisa dilihat bahwa apabila *sudut serpih* semakin negatif maka gaya potong akan semakin kecil juga. Nilai β sama dengan arctangen dari μ (koefisien gesek) yang pada penelitian ini nilainya adalah 0.2.

4.2 Analisa Mekanis Kedalaman Potong

Pada bagian ini pengaruh perbedaan kedalaman potong diteliti. Variasi pemotongan dengan sudut serpih 15° kedalaman

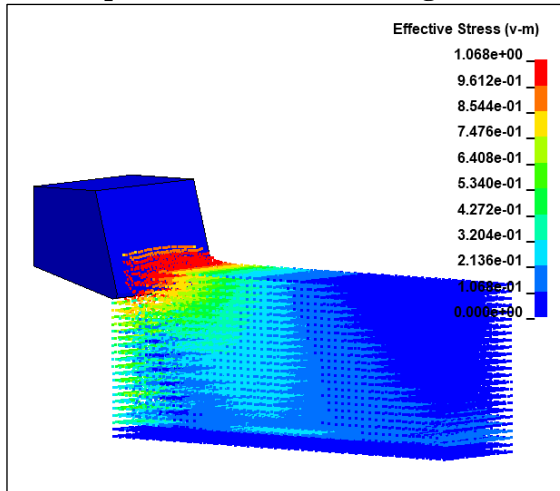
Tugas Akhir

Departemen Teknik Material



potong 1 dan 1.5 mm, dan tipe pemotongan *orthogonal* digunakan.

4.2.1. Sudut Serpih 15° Kedalaman Potong 1.5 mm



Gambar 4.11 Persebaran Tegangan Geser Kedalaman 1.5mm
Pada Awal Proses Pemotongan

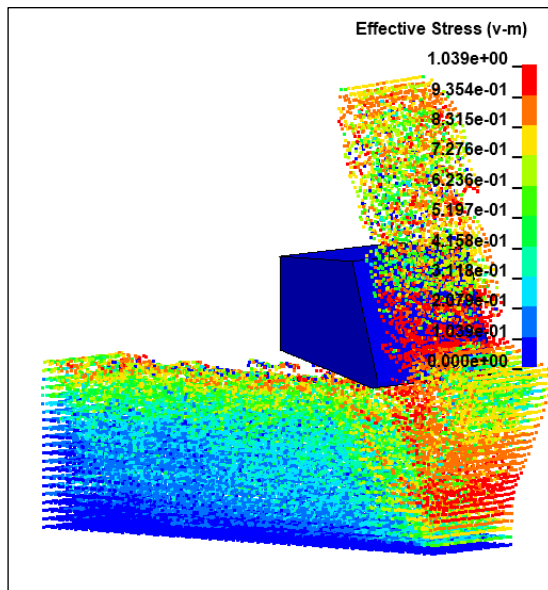
Dari gambar 4.11 diatas dapat dilihat bahwa nilai tegangan maksimum pada bagian ini adalah 1.068 GPa dimana terjadi sedikit peningkatan dari kedalaman 1mm yang memiliki nilai 1.066 GPa. Kemudian dari persebaran tegangan di daerah benda kerja juga mengalami peningkatan dimana warna biru muda semakin menyebar dari pada sebelumnya ini menunjukkan terjadinya peningkatang tegangan pada material benda kerja.



BAB IV ANALISIS DATA

Tabel 4.5 Tegangan Maksimum Pada 1 mm dan 1.5 mm Sudut 15° Pada Awal Pemotongan

Kedalaman Potong	Tegangan Maksimum (GPa)
1 mm	1.066
1.5 mm	1.068



Gambar 4.12 Persebaran Tegangan Geser Kedalaman 1.5mm Pada Akhir Proses Pemotongan

Dari gambar plot animasi *effective stress* dapat dilihat nilai tegangan maksimum pada tahap akhir ini berkisar 1.039 GPa. Dapat dilihat juga terdapat konsentrasi tegangan pada daerah bawah material benda kerja, terkonsentrasinya tegangan pada daerah ini diakibatkan tinggi benda kerja yang semakin berkurang dan persebaran tegangan yang besar sehingga



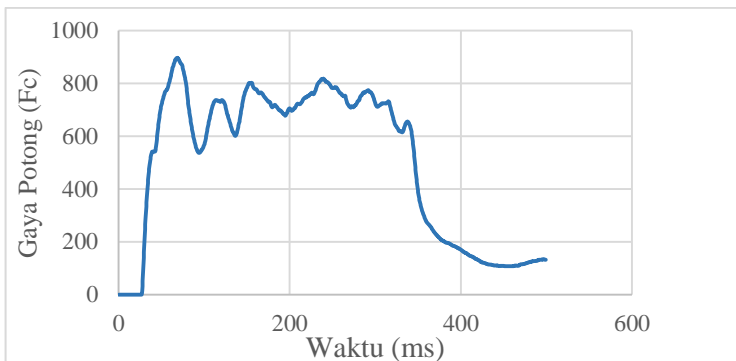
BAB IV ANALISIS DATA

tegangan menjadi terkonsentrasi di suatu titik dan mengakibatkan *crack*. Pada daerah permukaan juga memperlihatkan hasil yang tidak rata akibat dari nilai tegangan yang lebih tinggi. Nilai tegangan maksimum pada proses ini adalah 1.092 Gpa. Sedangkan pada keseluruhan proses nilai tegangan maksimum memiliki *range* 1.070-1.080 GPa.

Tabel 4.6 Tegangan Maksimum Pada 1 mm dan 1.5 mm Sudut 15° Akhir Pemotongan

Kedalaman Potong	Tegangan Maksimum (GPa)
1 mm	1.066
1.5 mm	1.068

Pada gambar 4.12 juga menunjukkan kekasaran permukaan yang meningkat daripada kedalaman 1mm. Hal ini juga disebutkan Kuttolamadom (2010) pada jurnalnya bahwa semakin besar kedalaman potong, maka luas penampang dari *chip* semakin besar dan berpengaruh terhadap hasil dari proses pemotongan dalam hal ini kelasaran permukaan.



Gambar 4.13 Perbandingan Gaya Potong Terhadap Waktu Kedalaman Potong 1.5 mm

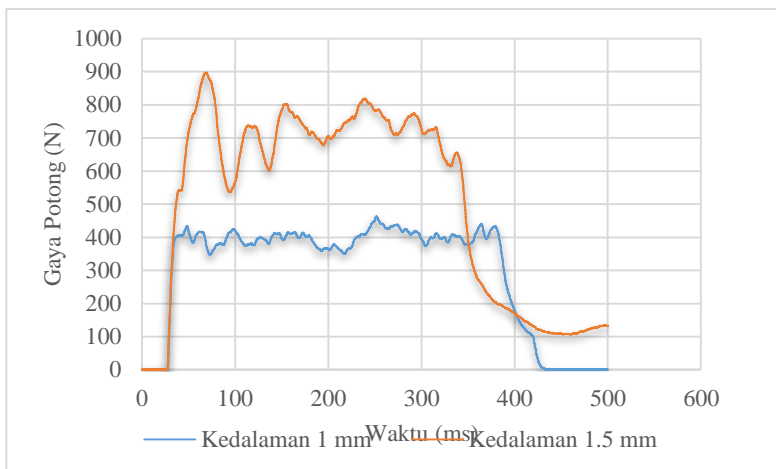


BAB IV ANALISIS DATA

Gambar diatas memperlihatkan trend nilai gaya potong (F_c) terhadap waktu, dari plot memperlihatkan gaya potong mengalami kenaikan dan penurunan sepanjang waktu. Gaya potong tertinggi pada proses ini adalah 911.8 N pada waktu 65.99 ms. Dengan nilai rata-rata gaya potong adalah 529.82 N. Vardhan (2011) menggunakan Ls-Dyna untuk mensimulasikan proses pemotongan *orthogonal* dan menghasilkan ketika sudut serpih dianggap konstan gaya potong meningkat dengan meningkatnya kedalaman potong yang mana hasil eksperimen juga menunjukkan hal yang sama meski nilainya tidak persis.

Tabel 4.7 Gaya Potong Pada Dua Kedalaman Potong

Kedalaman Potong	Gaya Potong (N)
1 mm	357.93
1.5 mm	529.82





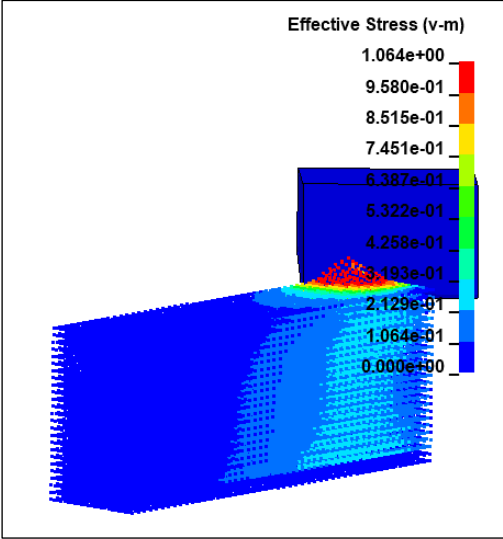
Gambar 4.14. Perbandingan Gaya Potong Terhadap Waktu Kedalaman Potong Berbeda

Dapat dilihat dari hasil simulasi diatas bahwa semakin dalam kedalaman potong maka gaya potong akan semakin meningkat hal ini terjadi karena kedalaman potong memiliki pengaruh terhadap gaya potong. Dari persamaan *merchant* berikut:

$$F_c = \frac{t \cdot x \cdot b \cdot k \cdot \cos(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)}$$
, dimana F_c adalah gaya potong, t adalah kedalaman potong, b adalah lebar *chip*, t adalah ketebalan *chip* yang belum dipotong β adalah sudut friksi, ϕ adalah sudut bidang geser, dan α adalah sudut serpih, Maka apabila kedalaman potong bertambah dimana pada proses ini dari 1 mm menjadi 1.5 mm, gaya potong juga akan meningkat.

4.3 Analisa Mekanis Tipe Pemotongan

Ada dua jenis tipe pemotongan yaitu *orthogonal* (lurus) dan *oblique* (miring) pada bagian ini dianalisa bagaimana pengaruh dari dua tipe pemotongan terhadap gaya potong dan persebaran tegangan pada benda kerja. Untuk variabel pemotongannya adalah sudut serpih 15° , kedalaman potong 1.5 mm dan tipe pemotongan *oblique* (miring).

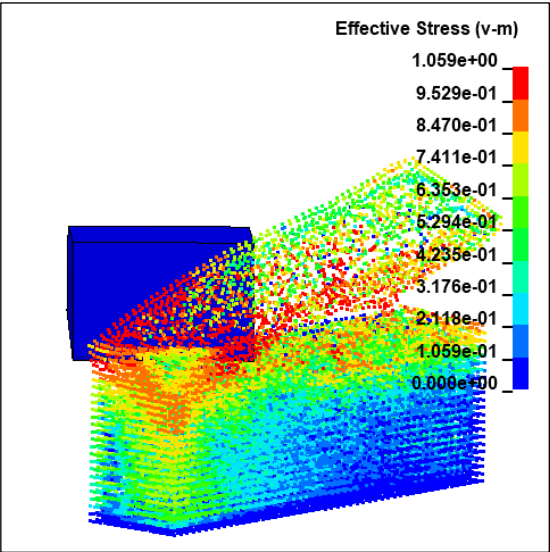


Gambar 4.15 Persebaran Tegangan Von Mises Pada Awal Proses Pemotongan *Oblique*

Dari gambar diatas dipeorleh nilai tegangan maksimum adalah 1.064 GPa. Nilai tegangan ini tidak jauh berbeda dari tegangan maksimum dari proses pemotongan *orthogonal* yaitu 1.066 GPa. Persebaran tegangan pada benda kerja menunjukkan persebaran tegaangan yang lebih dalam dari pada proses *orthogonal*.

Tabel 4.8 Tegangan Maksimum Pada Awal Pemotongan *Oblique* dan *Orthogonal*

Tipe Pemotongan	Tegangan Maksimum (GPa)
<i>Orthogonal</i>	1.066
<i>Oblique</i>	1.064

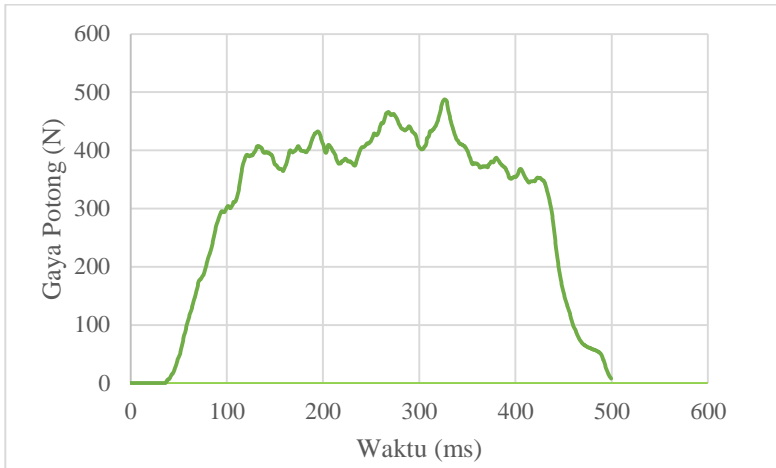


Gambar 4.16 Persebaran Tegangan Geser Pada Akhir Proses Pemotongan *Oblique*

Pada gambar 4.12 terlihat bahwa pada akhir proses pemotongan nilai tegangan maksimum adalah 1.059 GPa. Nilai ini berkurang dari proses orthogonal yang memiliki nilai 1.063 GPa. Secara keseluruhan proses tipe pemotongan *oblique* memiliki nilai tegangan yang lebih rendah dari pemotongan *orthogonal*.

Tabel 4.9 Tegangan Maksimum Pada Akhir Pemotongan *Oblique* dan *Orthogonal*

Tipe Pemotongan	Tegangan Maksimum (GPa)
<i>Orthogonal</i>	1.063
<i>Oblique</i>	1.059



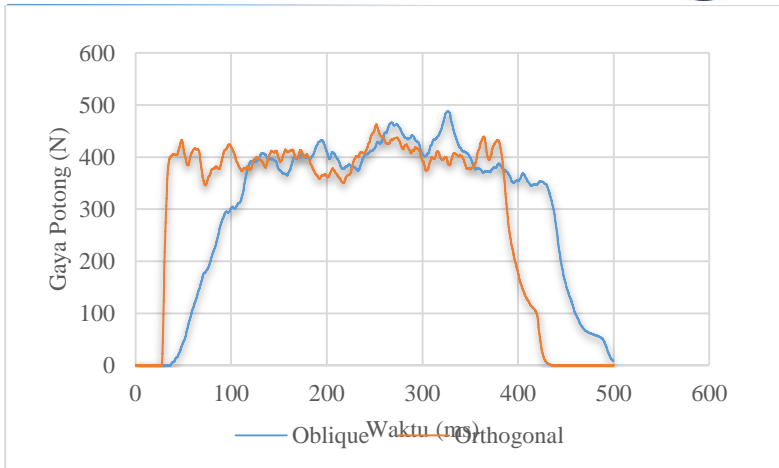
Gambar 4.17 Perbandingan Gaya Potong Terhadap Waktu
Oblique Cutting

Pada grafik perbandingan gaya potong terhadap waktu nilai gaya maksimum pada pemotongan *oblique* adalah 500.8 N lebih tinggi dari pemotongan *orthogonal* yang memiliki nilai maksimum 489.66 N. Sedangkan untuk rata-rata nilai gaya potong *oblique* sebesar 322.26 N.

Tabel 4.10 Gaya Potong Pada Tiga Sudut Serpilh

Tipe Pemotongan	Gaya Potong (N)
<i>Oblique</i>	357.93
<i>Orthogonal</i>	322.26

BAB IV ANALISIS DATA



Gambar 4.18. Perbandingan Gaya Potong Terhadap Waktu Dua Tipe Pemotongan



(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data dan pembahasan yang diuraikan pada BAB IV disertai dengan pembatasan masalah yang digunakan, maka kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah :

1. Penurunan gaya potong terjadi ketika sudut serpih perkakas mengalami penurunan dari 15° ke -15° . Gaya potong meningkat dengan bertambahnya nilai kedalaman potong dari 1 mm ke 1.5 mm pada sudut serpih yang konstan. Nilai tegangan maksimum diamati memiliki nilai tertinggi pada sudut -15° karena kontak perkakas dan benda kerja pada *secondary shear zone* yang luas, kemudian diikuti sudut serpih 15° karena nilai kontak yang tinggi pada *primary shear zone* antara material dan perkakas potong untuk kedalaman 1 mm. Peningkatan nilai tegangan juga terjadi pada pengaruh kedalaman potong dimana tegangan pada 1.5 mm lebih tinggi daripada 1 mm *chip* yang dihasilkan pada 1.5 mm lebih tebal daripada 1 mm yang berpengaruh pada nilai pada tegangan geser dimana pada bagian ini nilai tegangan tertinggi terjadi.
2. Gaya potong pada pemotongan *oblique* dari hasil simulasi menunjukkan nilai yang lebih tinggi daripada pemotongan *orthogonal*, pada nilai tegangan *oblique* memiliki nilai tegangan yang lebih rendah daripada pemotongan *orthogonal*.

5.2 Saran

- Model material yang berbeda atau baru dapat digunakan untuk menggambarkan dengan baik perilaku benda kerja dan bahan alat. Analisis



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

sensitivitas dapat dilakukan dengan memvariasikan parameter variabel dan menentukan seberapa baik model merespon perubahan

- Pengukuran eksperimental geometri chip dan gaya pemotongan juga harus dilakukan untuk mendapatkan perbandingan yang realistis antara analisis dan eksperimen.
- Metode SPH dapat diterapkan juga untuk proses permesinan lainnya seperti *milling* dan *drilling*.

DAFTAR PUSTAKA

- Abukhshim, N.A.; Mativenga, P.T.; Sheikh M.A. (2005). *Investigation of heat partition in high speed turning of high strength alloy steel*. International Journal of Machine Tools & Manufacture **45**, pp. 1687–1695
- Ambati, R. 2008. *Simulation and Analysis of Orthogonal Cutting and Drilling Processes using LS-DYNA*. Msc. Thesis. University of Stuttgart.
- Boothroyd, G. 1981. *Fundamentals of Machining and Machine Tools*. Washington: Scripta Book Company.
- Chophy, Anohito dan A. Krishnan. 2014. *Thermal Analysis of Single Point Cutting Tool*. Mechanical Engineering. College of Engineering Adoor. Manakala
- Fajar kurniawan. 2008. *Study Tentang Cutting Force Mesin Bubut (Desain Dynamometer Sederhana)*. Surakarta. Jurusan Teknik Mesin - Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Hamed, Sayed and Gerald Jo. 2017. *Orthogonal Metal Cutting Simulation of Steel AISI 1045 via Smoothed Particle Hydrodynamic Method*. World Congress on Engineering. London, U.K.
- Jaspers, S. P. F. C. Dautzenberg, J. H. and D. A. Taminiau. 1998. *Int J Adv Manufacture Technology: Temperature Measurement in Orthogonal Metal Cutting*. 14:7-12. London. Springer – Verlag London Limited.
- Johnson, G.R. and Cook, W.H. 1993. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain-rates and High Temperatures. *Seventh International Symposium on Ballistics* 7: 541-547.
- Kalpakjian, S. 1995. *Manufacturing Process for Engineering and Technology*, third Edition, Addison Wesley Publishing Company.
- Karthick, N. 2009. *Advance Materials Technology: Selection Of Materials For Cutting Tools CBN and PCD*. M.E Manufacturing Engg, Anna Univ – MIT, Chrompet.

- Kuttalamodom, Matthew, Sina Hamzehlouia, M. Laine Mears. 2010. *Effect of Machining Feed on Surface Roughness in Cutting 6061 Aluminum*. International Center for Automotive Research-Clemson University.
- Limido, Jérôme, Espinosa Christine, Salaun Michel, Mabru Catherine, Chieragatti Rémy, Lacomme Jean-Luc. Metal cutting modelling SPH approach. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, vol. 9, n° 3-4, pp. 177-196. ISSN 1748-5711
- Oxley, P.L.B. 1990. *Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability*. *Journal of Applied Mechanics* 57: 253.
- Ozel, T. and Zeren, E. 2007. Finite Element Modelling the Influence of Edge Roundness on the Stress and Temperature Fields Induced by High Speed Machining. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 35: 255-267.
- Payton, L.N. 2000. *Orthogonal Machining of Copper using a Virtual Quick stop Device*. Master's Thesis, Auburn University, USA,.
- Rochim T. 1993. *Proses Permesinan*. Higher Education Development Support Project. Jakarta.
- Schey, John. 2000. *Introduction to Manufacturing Processes 3rd edition*. McGraw Hill
- Vardhan, Vishnu. 2011. *Finite Element Simulation of Orthogonal Metal Cutting using LS Dyna*. Graduate Faculty of Auburn University. Auburn, Alabama.
- Yuliarman. 2008. *Studi Pemotongan Optimum Pembubutan Keras Dan Kering Baja Perkakas AISI O1 Menggunakan Pahat Keramik (Al₂O₃ + TiC)*. USU digital library.

LAMPIRAN

1. Dyna plot gaya Fx pada sudut serpih 0° kedalaman potong 1mm

dynaplot

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

Time

X-force

Contact Id

1 1667

1

* Minval= 0.0000000000e+000 at time= 0.0000000000

* Maxval= 6.0859497070e+002 at time= 31.4960002899

0.0000000000e+000 0.0000000000e+000

1.1931300163e+000 0.0000000000e+000

2.9938099384e+000 0.0000000000e+000

3.2939200401e+000 0.0000000000e+000

4.7944798470e+000 0.0000000000e+000

5.0946002007e+000 0.0000000000e+000

2.4894699097e+001 0.0000000000e+000

2.5194698334e+001 6.0792900085e+001

2.5494300842e+001 2.1412699890e+002

2.5793600082e+001	2.9365899658e+002
2.6093301773e+001	3.7770700073e+002
2.6393100739e+001	4.2973699951e+002
2.6699998856e+001	4.6533697510e+002
2.6999300003e+001	4.8715100098e+002
2.7298301697e+001	5.1350695801e+002
2.7597099304e+001	5.2506097412e+002
2.7895799637e+001	5.3455999756e+002
2.8194400787e+001	5.5116503906e+002
2.8492900848e+001	5.5656799316e+002
2.8798601151e+001	5.6629901123e+002
2.9097000122e+001	5.7271197510e+002
2.9395401001e+001	5.8347003174e+002
2.9693698883e+001	5.8815997314e+002
2.9999300003e+001	5.9039001465e+002
3.0297500610e+001	5.9975000000e+002
3.0595699310e+001	5.9864501953e+002
3.0893600464e+001	5.9902398682e+002
3.1198497772e+001	6.0356396484e+002
3.1496000290e+001	6.0859497070e+002
3.1793399811e+001	6.0593200684e+002

3.2097797394e+001	6.0503900146e+002
3.2394901276e+001	6.0778900146e+002
3.2699199677e+001	6.0759002686e+002
3.2996101379e+001	6.0402001953e+002
3.3293102264e+001	5.9684600830e+002
3.3597297668e+001	5.8930200195e+002
3.3894302368e+001	5.9411700439e+002
3.4198600769e+001	5.9388195801e+002
3.4495498657e+001	5.9190997314e+002
3.4799598694e+001	5.8811700439e+002
3.5096298218e+001	5.7660498047e+002
3.5392799377e+001	5.6275000000e+002
3.5696201324e+001	5.5472796631e+002
3.5999198914e+001	5.4967095947e+002
3.6294700623e+001	5.3823999023e+002
3.6597000122e+001	5.2879602051e+002
3.6899002075e+001	5.1839599609e+002
3.7193500519e+001	5.0763696289e+002
3.7494701385e+001	4.9696102905e+002
3.7795600891e+001	4.9811401367e+002
3.8096099854e+001	5.0786801147e+002

4.7993698120e+001	5.4166296387e+002
4.8299701691e+001	5.3954699707e+002
4.8598400116e+001	5.4167199707e+002
4.8897399902e+001	5.4055102539e+002
4.9196300507e+001	5.3596398926e+002
4.9495201111e+001	5.3607000732e+002
4.9794097900e+001	5.3348999023e+002
6.0599796295e+001	4.2060699463e+002
6.0898200989e+001	4.1779998779e+002
6.1196899414e+001	4.0365100098e+002
6.1495399475e+001	3.9802798462e+002
6.1793899536e+001	3.9021099854e+002
6.2099700928e+001	3.8333297729e+002
6.2398303986e+001	3.8119598389e+002
6.2697101593e+001	3.7605599976e+002
6.2995700836e+001	3.7853201294e+002
6.3294399261e+001	3.7277499390e+002
6.3592998505e+001	3.6493798828e+002
6.3898700714e+001	3.5291299438e+002

6.4197196960e+001	3.5140802002e+002
6.4495597839e+001	3.5001998901e+002
6.4794097900e+001	3.5502600098e+002
6.5099502563e+001	3.5709600830e+002
6.5397697449e+001	3.6123300171e+002
6.5696105957e+001	3.6626998901e+002
6.5994300842e+001	3.6870700073e+002
6.6299697876e+001	3.6706201172e+002
6.6597900391e+001	3.7141500854e+002
6.6896202087e+001	3.6183499146e+002
6.7194496155e+001	3.5902499390e+002
6.7499900818e+001	3.7188900757e+002
6.7797897339e+001	3.7502899170e+002
6.8095703125e+001	3.7762597656e+002
6.8393394470e+001	3.8770300293e+002
6.8698501587e+001	3.9245401001e+002
6.8996398926e+001	3.8562701416e+002
6.9294395447e+001	3.7467797852e+002
6.9599601746e+001	3.6758200073e+002
6.9897399902e+001	3.7162298584e+002
7.0195098877e+001	3.6931399536e+002

7.0493194580e+001	3.6255801392e+002
7.0798202515e+001	3.6338800049e+002
7.1096000671e+001	3.6232098389e+002
7.1393600464e+001	3.6666299438e+002
7.1698394775e+001	3.6050997925e+002
7.1996200562e+001	3.5261199951e+002
7.2294303894e+001	3.4688800049e+002
7.2599700928e+001	3.5391601563e+002
7.2897705078e+001	3.6379699707e+002
7.3195396423e+001	3.7175701904e+002
7.3500000000e+001	3.7666299438e+002
7.3798103333e+001	3.7233599854e+002
7.4096099854e+001	3.8302200317e+002
7.4393806458e+001	3.8253201294e+002
7.4699096680e+001	3.7496701050e+002
7.4997001648e+001	3.7813400269e+002
7.5294998169e+001	3.8143301392e+002
7.5592895508e+001	3.8244900513e+002
7.5898101807e+001	3.8251501465e+002
7.6196098328e+001	3.8264300537e+002
7.6493904114e+001	3.8715899658e+002

7.6798698425e+001	3.9944799805e+002
7.7096099854e+001	4.0235800171e+002
7.7393402100e+001	4.0746298218e+002
7.7697906494e+001	4.0788000488e+002
7.7995094299e+001	4.1420101929e+002
7.8299499512e+001	4.1435400391e+002
7.8596900940e+001	4.0970898438e+002
7.8894699097e+001	4.0739599609e+002
7.9199897766e+001	4.1472998047e+002
7.9498100281e+001	4.1041497803e+002
7.9796203613e+001	4.1103701782e+002
8.0094200134e+001	4.2110299683e+002
8.0399604797e+001	4.2679901123e+002
8.0697502136e+001	4.2783398438e+002
8.0995498657e+001	4.3185400391e+002
8.1293502808e+001	4.1808801270e+002
8.1599098206e+001	4.2184399414e+002
8.1897094727e+001	4.3352398682e+002
8.2195297241e+001	4.3869299316e+002
8.2493400574e+001	4.4249600220e+002
8.2798698425e+001	4.4241198730e+002

8.3096603394e+001	4.4087100220e+002
8.3394599915e+001	4.4388198853e+002
8.3699897766e+001	4.4372802734e+002
8.3997795105e+001	4.5092001343e+002
8.4295799255e+001	4.5741299438e+002
8.4593597412e+001	4.6025500488e+002
8.4898796082e+001	4.6677798462e+002
8.5196601868e+001	4.7446197510e+002
8.5494400024e+001	4.7360202026e+002
8.5799598694e+001	4.7274398804e+002
1.0289499664e+002	4.2466699219e+002
1.0319400024e+002	4.3517797852e+002
1.0350000000e+002	4.3436099243e+002
1.0379799652e+002	4.2716198730e+002
1.0409599304e+002	4.2429598999e+002
1.0439399719e+002	4.2045202637e+002
1.0470000458e+002	4.1908398438e+002
1.0499700165e+002	4.1210198975e+002
1.0529500580e+002	4.0281301880e+002
1.0559999847e+002	4.0204299927e+002
1.0589699554e+002	4.1063800049e+002

1.0619399261e+002	4.1052297974e+002
1.0649900818e+002	4.1523901367e+002
1.0679700470e+002	4.2074099731e+002
1.0709500122e+002	4.1969000244e+002
1.0740000153e+002	4.1038598633e+002
1.0769799805e+002	3.9790798950e+002
1.0799600220e+002	3.9419500732e+002
1.0829399872e+002	3.9133502197e+002
1.0859899902e+002	3.8753198242e+002
1.0889699554e+002	3.7636398315e+002
1.0919400787e+002	3.7539700317e+002
1.0949900055e+002	3.7528701782e+002
1.0979599762e+002	3.7939501953e+002
1.1009999847e+002	3.7311297607e+002
1.1039700317e+002	3.5981399536e+002
1.1069400024e+002	3.5530999756e+002
1.1099900055e+002	3.5599600220e+002
1.1129599762e+002	3.5086801147e+002
1.1159399414e+002	3.4871899414e+002
1.1189999390e+002	3.4816799927e+002
1.1219700623e+002	3.4125500488e+002

1.1249500275e+002	3.4113699341e+002
1.1280000305e+002	3.3997900391e+002
1.1309799957e+002	3.4136801147e+002
1.1339600372e+002	3.4039801025e+002
1.1369400024e+002	3.3719000244e+002
1.1400000000e+002	3.4591897583e+002
1.1429799652e+002	3.4866000366e+002
1.1459600067e+002	3.5418402100e+002
1.1489399719e+002	3.5388998413e+002
1.1519900513e+002	3.5093801880e+002
1.1549700165e+002	3.4954000854e+002
1.1579500580e+002	3.4744799805e+002
1.1609300232e+002	3.4135699463e+002
1.1639800262e+002	3.3405499268e+002
1.1669599915e+002	3.3135400391e+002
1.1699299622e+002	3.3991101074e+002
1.1729799652e+002	3.4132400513e+002
1.1759500122e+002	3.3991799927e+002
1.1789400482e+002	3.4291400146e+002
1.1819900513e+002	3.4653500366e+002
1.1849600220e+002	3.5272900391e+002

1.1879399872e+002	3.5940899658e+002
1.1909899902e+002	3.5542999268e+002
1.1939599609e+002	3.5447399902e+002
1.1969399261e+002	3.6925500488e+002
1.1999800110e+002	3.8297500610e+002
1.2029600525e+002	3.8041201782e+002
1.2059400177e+002	3.6890499878e+002
1.2090000153e+002	3.7451199341e+002
1.2119799805e+002	3.7136901855e+002
1.2149599457e+002	3.6402099609e+002
1.2179399872e+002	3.7076800537e+002
1.2209899139e+002	3.7946600342e+002
1.2239700317e+002	3.8300399780e+002
1.2269400024e+002	3.9216000366e+002
1.2299900055e+002	3.9271899414e+002
1.2329599762e+002	3.8732501221e+002
1.2359299469e+002	3.9430899048e+002
1.2389800262e+002	3.8895800781e+002
1.2419500732e+002	3.8558200073e+002
1.2449300385e+002	3.8974899292e+002
1.2479799652e+002	3.9289401245e+002

1.6289599609e+002	4.1964501953e+002
1.6319400024e+002	4.2402502441e+002
1.6350000000e+002	4.2482501221e+002
1.6379800415e+002	4.2689999390e+002
1.6409599304e+002	4.3224801636e+002
1.6439399719e+002	4.2645797729e+002
1.6469898987e+002	4.2798800659e+002
1.6499700928e+002	4.3047097778e+002
1.6529598999e+002	4.3549398804e+002
1.6559400940e+002	4.3522802734e+002
1.6590000916e+002	4.2692898560e+002
1.6619900513e+002	4.1841699219e+002
1.6649700928e+002	4.2199102783e+002
1.6679499817e+002	4.3070101929e+002
1.6709400940e+002	4.3231802368e+002
1.6740000916e+002	4.3895300293e+002
1.6769799805e+002	4.3977297974e+002
1.6799600220e+002	4.3547903442e+002
1.6829499817e+002	4.2677899170e+002
1.6860000610e+002	4.1726498413e+002
1.6889799500e+002	4.1593698120e+002

1.6919700623e+002	4.1917401123e+002
1.6949499512e+002	4.2306799316e+002
1.6979400635e+002	4.2899499512e+002
1.7009899902e+002	4.1692401123e+002
1.7039700317e+002	4.1017599487e+002
1.7069599915e+002	4.2063198853e+002
1.7099398804e+002	4.3105603027e+002
1.7129901123e+002	4.3656100464e+002
1.7159700012e+002	4.3167700195e+002
1.7189500427e+002	4.4239401245e+002
1.7219999695e+002	4.5377798462e+002
1.7249800110e+002	4.5170397949e+002
1.7279600525e+002	4.4982699585e+002
1.7309399414e+002	4.4393301392e+002
1.7339900208e+002	4.4269097900e+002
1.7369599915e+002	4.4600201416e+002
1.7400000000e+002	4.4350299072e+002
1.7429699707e+002	4.4811801147e+002
1.7459399414e+002	4.5885900879e+002
1.7489700317e+002	4.5684399414e+002
1.7520100403e+002	4.5479296875e+002

1.7549800110e+002	4.5538500977e+002
1.7579499817e+002	4.4686798096e+002
1.7610000610e+002	4.4961099243e+002
1.7639801025e+002	4.6381503296e+002
1.7669500732e+002	4.7969998169e+002
1.7699899292e+002	4.8812399292e+002
1.7729699707e+002	4.9108099365e+002
1.7759399414e+002	4.8349600220e+002
1.7790000916e+002	4.7921301270e+002
1.7819799805e+002	4.8104699707e+002
1.7849600220e+002	4.8105899048e+002
1.7879400635e+002	4.8786401367e+002
1.7909899902e+002	4.8365301514e+002
1.7939700317e+002	4.8057397461e+002
1.7969599915e+002	4.7795199585e+002
1.7999400330e+002	4.6777902222e+002
1.8029899597e+002	4.8345898438e+002
1.8059700012e+002	4.9010601807e+002
1.8089498901e+002	5.0217401123e+002
1.8119400024e+002	5.0021398926e+002
1.8149900818e+002	4.8769302368e+002

1.8179699707e+002	4.8981900024e+002
1.8209500122e+002	4.9966601563e+002
1.8239999390e+002	5.0594302368e+002
1.8269799805e+002	4.9966101074e+002
1.8299699402e+002	4.9077301025e+002
1.8329499817e+002	4.7543997192e+002
1.8360099792e+002	4.6799899292e+002
1.8389900208e+002	4.7865399170e+002
1.8419699097e+002	4.8584500122e+002
1.8449499512e+002	4.9223699951e+002
1.8480099487e+002	4.9091802979e+002
1.8509899902e+002	4.7536102295e+002
1.8539700317e+002	4.6856097412e+002
1.8569599915e+002	4.7294403076e+002
1.8599400330e+002	4.6609997559e+002
1.8630000305e+002	4.5936196899e+002
1.8659800720e+002	4.6416702271e+002
1.8689599609e+002	4.6132101440e+002
1.8719400024e+002	4.4715100098e+002
1.8749899292e+002	4.3822799683e+002
1.8779699707e+002	4.3871102905e+002

1.8809500122e+002 4.5687799072e+002

1

2.3220100403e+002 4.2907501221e+002

2.3249800110e+002 4.2530297852e+002

2.3279600525e+002 4.2987298584e+002

2.3310000610e+002 4.3893798828e+002

2.3339801025e+002 4.3894000244e+002

2.3369601440e+002 4.3685598755e+002

2.3400099182e+002 4.4484100342e+002

2.3429899597e+002 4.4675997925e+002

2.3459698486e+002 4.5340298462e+002

2.3489498901e+002 4.5918798828e+002

2.3520100403e+002 4.6398001099e+002

2.3549899292e+002 4.5514596558e+002

2.3579699707e+002 4.4393902588e+002

2.3609600830e+002 4.3424099731e+002

2.3639399719e+002 4.3236499023e+002

2.3670001221e+002 4.3777899170e+002

2.3699801636e+002 4.3324899292e+002

2.3729701233e+002 4.2381903076e+002

2.3759501648e+002 4.1601699829e+002

2.3790100098e+002	4.1722201538e+002
2.3819898987e+002	4.2741799927e+002
2.3849699402e+002	4.2927798462e+002
2.3879598999e+002	4.1828799438e+002
2.3910099792e+002	4.1442700195e+002
2.3940000916e+002	4.0588497925e+002
2.3969799805e+002	3.9785299683e+002
2.3999600220e+002	3.9703201294e+002
2.4029400635e+002	3.9453698730e+002
2.4059999084e+002	3.9089999390e+002
2.4089799500e+002	3.9308599854e+002
2.4119699097e+002	3.8600900269e+002
2.4149499512e+002	3.8348400879e+002
2.4179399109e+002	3.8269299316e+002
2.4210000610e+002	3.8261499023e+002
2.4239900208e+002	3.8483401489e+002
2.4269700623e+002	3.8879000854e+002
2.4299499512e+002	3.9090899658e+002
2.4330101013e+002	3.9068099976e+002
2.4359901428e+002	3.9659201050e+002
2.4389700317e+002	3.9735702515e+002

2.4419500732e+002	3.9521401978e+002
2.4450000000e+002	3.9381799316e+002
2.4479899597e+002	3.8523599243e+002
2.4509700012e+002	3.8091198730e+002
2.4539498901e+002	3.8068298340e+002
2.4570100403e+002	3.7240701294e+002
2.4599900818e+002	3.7316500854e+002
2.4629800415e+002	3.6887200928e+002
2.4659600830e+002	3.6370999146e+002
2.4689500427e+002	3.5962100220e+002
2.4719998169e+002	3.6270199585e+002
2.4749801636e+002	3.6088299561e+002
2.4779698181e+002	3.5364498901e+002
2.4809501648e+002	3.5802301025e+002
2.4840100098e+002	3.7025100708e+002
2.4869900513e+002	3.8921499634e+002
2.4899800110e+002	3.9437899780e+002
2.4929598999e+002	3.9112799072e+002
2.4959500122e+002	3.8849002075e+002
2.4990100098e+002	3.8901998901e+002
2.5020001221e+002	3.9400100708e+002

2.5049801636e+002	3.9636801147e+002
2.5079701233e+002	3.9843200684e+002
2.5109500122e+002	4.0038000488e+002
2.5140100098e+002	4.0262298584e+002
2.5169999695e+002	4.0892501831e+002
2.5199800110e+002	4.1485400391e+002
2.5229598999e+002	4.1291198730e+002
2.5259399414e+002	4.1360696411e+002
2.5290000916e+002	4.1804598999e+002
2.5319799805e+002	4.2710800171e+002
2.5349600220e+002	4.3378100586e+002
2.5379400635e+002	4.3312002563e+002
2.5409999084e+002	4.2794799805e+002
2.5439799500e+002	4.3009802246e+002
2.5469601440e+002	4.3449896240e+002
2.5499401855e+002	4.4527301025e+002
2.5530000305e+002	4.6100302124e+002
2.5559799194e+002	4.6542102051e+002
2.5589498901e+002	4.5389498901e+002
2.5620101929e+002	4.7425500488e+002
2.5649899292e+002	4.8996600342e+002

2.5679699707e+002	4.9737500000e+002
2.5709500122e+002	4.8330401611e+002
2.5740100098e+002	4.9309503174e+002
2.5769897461e+002	5.0012396240e+002
2.5799697876e+002	4.9189001465e+002
2.5829400635e+002	4.8970599365e+002
2.5860000610e+002	4.9974197388e+002
2.5889700317e+002	5.1377600098e+002
2.5919500732e+002	5.0976501465e+002
2.5950100708e+002	4.9749499512e+002
2.5979901123e+002	4.9304901123e+002
2.6009701538e+002	5.0156597900e+002
2.6039498901e+002	4.9330902100e+002
2.6070098877e+002	4.9017501831e+002
2.6099899292e+002	5.0547399902e+002
2.6129797363e+002	5.1668103027e+002
2.6159698486e+002	5.1285900879e+002
2.6189498901e+002	5.1016302490e+002
2.6220098877e+002	5.0434698486e+002
2.6250000000e+002	5.0531701660e+002
2.6279800415e+002	4.9780596924e+002

2.6309698486e+002	4.9612597656e+002
2.6339498901e+002	5.1416101074e+002
2.6370101929e+002	5.1672503662e+002
2.6400000000e+002	5.1178399658e+002
2.6429800415e+002	5.1291601563e+002
2.6459701538e+002	5.2467797852e+002
2.6489501953e+002	5.2997796631e+002
2.6519998169e+002	5.2896301270e+002
2.6549798584e+002	5.2043701172e+002
2.6579699707e+002	5.1008901978e+002
2.6609500122e+002	5.1370202637e+002
2.6639999390e+002	5.2074798584e+002
2.6669799805e+002	5.1197601318e+002
2.6699700928e+002	5.0462399292e+002
2.6729501343e+002	5.0838998413e+002
2.6760098267e+002	5.0706399536e+002
2.6789898682e+002	5.0810299683e+002
2.6819799805e+002	4.9397998047e+002
2.6849600220e+002	4.8704098511e+002
2.6879498291e+002	4.9148696899e+002
2.6910101318e+002	4.8958901978e+002

2.6939898682e+002	4.8276602173e+002
2.6969799805e+002	4.8091302490e+002
2.6999700928e+002	4.6545199585e+002
2.7029501343e+002	4.6245700073e+002
2.7060101318e+002	4.6625698853e+002
2.7090002441e+002	4.5883898926e+002
2.7119799805e+002	4.5388098145e+002
2.7149700928e+002	4.4195397949e+002
2.7179501343e+002	4.3833898926e+002
2.7210098267e+002	4.4044000244e+002
2.7239999390e+002	4.4741201782e+002
2.7269799805e+002	4.4062799072e+002
2.7299700928e+002	4.3076101685e+002
2.7329498291e+002	4.3155999756e+002
2.7360101318e+002	4.3606399536e+002
2.7389901733e+002	4.3211499023e+002
2.7419799805e+002	4.2678097534e+002
2.7449600220e+002	4.2927899170e+002
2.7479501343e+002	4.3709698486e+002
2.7510000610e+002	4.4413400269e+002
2.7539898682e+002	4.4558700562e+002

2.7569699097e+002	4.4093298340e+002
2.7599600220e+002	4.3311499023e+002
2.7630099487e+002	4.3480300903e+002
2.7660000610e+002	4.3494100952e+002
2.7689801025e+002	4.2650299072e+002
2.7719699097e+002	4.2436099243e+002
2.7749600220e+002	4.2897201538e+002
2.7779400635e+002	4.3417602539e+002
2.7809997559e+002	4.3922500610e+002
2.7839898682e+002	4.3848599243e+002
2.7869799805e+002	4.3165899658e+002
2.7899600220e+002	4.3644799805e+002
2.7929498291e+002	4.3354901123e+002
2.7960101318e+002	4.3266302490e+002
2.7989999390e+002	4.3838702393e+002
2.8019799805e+002	4.4078201294e+002
2.8049700928e+002	4.4536901855e+002
2.8079501343e+002	4.4296597290e+002
2.8110098267e+002	4.4790502930e+002
2.8139999390e+002	4.5835299683e+002
2.8169799805e+002	4.6368698120e+002

2.8199697876e+002	4.5876898193e+002
2.8229498291e+002	4.5908798218e+002
2.8260101318e+002	4.6444201660e+002
2.8289898682e+002	4.6005401611e+002
2.8319598389e+002	4.5537298584e+002
2.8350100708e+002	4.6081799316e+002
2.8380001831e+002	4.6061901855e+002
2.8409899902e+002	4.6006298828e+002
2.8439700317e+002	4.4776300049e+002
2.8469601440e+002	4.4495300293e+002
2.8499499512e+002	4.4217901611e+002
2.8530099487e+002	4.4334997559e+002
2.8559899902e+002	4.3765896606e+002
2.8589797974e+002	4.1785101318e+002
2.8619699097e+002	4.1392797852e+002
2.8649499512e+002	4.0254400635e+002
2.8680099487e+002	3.9525299072e+002
2.8709899902e+002	4.0601101685e+002
2.8739801025e+002	4.2112799072e+002
2.8769601440e+002	4.2246798706e+002
2.8799499512e+002	4.2878698730e+002

2.8830099487e+002	4.1707202148e+002
2.8859899902e+002	4.1538800049e+002
2.8889797974e+002	4.2532202148e+002
2.8919598389e+002	4.2806600952e+002
2.8949499512e+002	4.2439297485e+002
2.8979998779e+002	4.1652798462e+002
2.9009799194e+002	4.1342901611e+002
2.9039700317e+002	4.2452102661e+002
2.9069500732e+002	4.2361898804e+002
2.9100100708e+002	4.2654400635e+002
2.9129901123e+002	4.2370901489e+002
2.9159802246e+002	4.2807699585e+002
2.9189599609e+002	4.2939300537e+002
2.9220199585e+002	4.3681402588e+002
2.9250000000e+002	4.3493200684e+002
2.9279800415e+002	4.2586297607e+002
2.9309698486e+002	4.2831600952e+002
2.9339498901e+002	4.2495098877e+002
2.9370101929e+002	4.3269799805e+002
2.9399899292e+002	4.4091500854e+002
2.9429699707e+002	4.3979602051e+002

2.9459500122e+002	4.3617300415e+002
2.9490100098e+002	4.3457397461e+002
2.9519897461e+002	4.2762799072e+002
2.9549697876e+002	4.2322698975e+002
2.9579598999e+002	4.2707699585e+002
2.9610101318e+002	4.3802999878e+002
2.9639999390e+002	4.4199398804e+002
3.5280001831e+002	4.3995098877e+002
3.5309802246e+002	4.3855200195e+002
3.5339700317e+002	4.5012597656e+002
3.5369500732e+002	4.5421899414e+002
3.5400100708e+002	4.5043301392e+002
3.5429998779e+002	4.4359103394e+002
3.5459799194e+002	4.4731497192e+002
3.5489700317e+002	4.5370401001e+002
3.5520199585e+002	4.5799096680e+002
3.5550000000e+002	4.6161999512e+002
3.5579699707e+002	4.6444100952e+002
3.5610098267e+002	4.6223696899e+002
3.5639901733e+002	4.5326300049e+002
3.5669601440e+002	4.4780203247e+002

3.5700198364e+002	4.4896401978e+002
3.5729898071e+002	4.5673898315e+002
3.5759698486e+002	4.4865399170e+002
3.5789498901e+002	4.3883999634e+002
3.5820098877e+002	4.4414401245e+002
3.5850000000e+002	4.5226599121e+002
3.5879800415e+002	4.5829901123e+002
3.5909701538e+002	4.5636300659e+002
3.5939498901e+002	4.5188998413e+002
3.5970098877e+002	4.3759197998e+002
3.6000000000e+002	4.3538900757e+002
3.6029800415e+002	4.4039602661e+002
3.6059597778e+002	4.4165502930e+002
3.6089498901e+002	4.2992901611e+002
3.6120098877e+002	4.3357299805e+002
3.6150000000e+002	4.2595401001e+002
3.6179901123e+002	4.2756799316e+002
3.6209701538e+002	4.3666900635e+002
3.6239599609e+002	4.4253302002e+002
3.6269500732e+002	4.4417401123e+002
4.4339801025e+002	2.1988099441e-002

4.4369702148e+002 5.1868800074e-004

4.4399600220e+002 0.0000000000e+000

4.4429498291e+002 0.0000000000e+000

endplot

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Medan, 09 Oktober 1995, merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Mayang Mangurai, SD Pusri, kemudian SMP Negeri 2 Kuala Tungkal dan SMA Negeri 5 Jambi. Setelah lulus dari SMA penulis melanjutkan studinya di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2013 terdaftar dengan NRP

2713100076. Di Teknik Material dan Metalurgi penulis memilih bidang Metalurgi Manufaktur dengan fokus dalam simulasi dan analisa numerik. Penulis sejak kuliah aktif mengikuti organisasi di HMMT ITS sebagai Staff Ahli BSO Kewirausahaan, Staff ahli Humas LDJ Ash Habul Kahfi. Penulis dapat dihubungi di 081263156527 atau email ke mustafidrambey@gmail.com

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)